

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»

**ГЛАВНЫЙ ПРИВОД КАЛИБРОВОЧНО-ВЫТЯЖНОГО СТАНА
ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА**

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение
(по отраслям)

Идентификационный код ВКР: 146

Екатеринбург 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»
Институт инженерно-педагогического образования
Кафедра электрооборудования и энергоснабжения

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:
Заведующая кафедрой ЭС

_____ А.О. Прокубовская
« _____ » _____ 2016 г.

ГЛАВНЫЙ ПРИВОД КАЛИБРОВОЧНО-ВЫТЯЖНОГО СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Выпускная квалификационная работа бакалавра
по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение
(по отраслям)
профиля подготовки «Энергетика»
специализации «Электропривод и автоматика»

Идентификационный код ВКР: 146

Исполнитель:
студент группы ЭП-401

Д.Ю.Бойко

Руководитель:

В.П. Чудновский

Нормоконтролер:
ст. преподаватель

Н.В. Шайхадарова

Екатеринбург 2016

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 68 страницах, содержит 8 рисунков, 3 таблицы, 20 источника литературы, а также 5 приложения.

Ключевые слова: ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, КЛЕТЬ, ЭЛЕКТРОПРИВОД, КАЛИБРОВОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ СТАН.

Объектом исследования выпускной квалификационной работы является электрооборудование главного привода калибровочно-вытяжного стана трубопрокатного агрегата.

Предметом исследования является главный привод калибровочно-вытяжного стана трубопрокатного агрегата.

Цель работы – разработать главный привод калибровочно-вытяжного стана трубопрокатного агрегата.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена вопросам главного привода калибровочно-вытяжного стана трубопрокатного агрегата ТПА – 350 горячей прокатки.

В данной работе дано описание технологического процесса стана и его характеристики, представлена кинематическая схема одной клетки стана. Сформулированы требования к электроприводу.

Произведен выбор типа электропривода и преобразователя агрегата, расчёты режимов преобразователя. На основании исходных данных рассчитаны мощности электродвигателя и выбранный двигатель проверен по нагреву и перегрузочной способности.

Выполнены расчёты системы автоматического регулирования, рассчитаны параметры регуляторов.

Произведен технико-экономический расчёт эффективности проекта от внедрения нового оборудования.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ОПИСАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ	8
1.1 Описание технологического процесса трубопрокатного агрегата ТПА-350	8
1.2 Устройство и характеристики калибровочно-вытяжного стана.....	13
1.3 Требование к главному электроприводу калибровочно- вытяжного стана	14
2 ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	16
2.1 Выбор типа электропривода	16
2.2 Расчёт мощности электродвигателя.....	17
2.3 Проверка двигателя на нагрев	19
2.4 Проверка двигателя по перегрузочной способности	20
2.5 Расчёт момента двигателя с учётом ослабления поля	21
2.6 Расчёт коэффициента загрузки двигателя статическим моментом прокатки	21
2.7 Технические данные двигателя	22
3. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА	25
3.1 Выбор преобразователя для питания двигателей главного привода	25
3.2 Тиристорный преобразователь	26
3.3 Двигатель с механизмом	28
3.4 Двигатель с тиристорным преобразователем	29
3.5 Расчёт режимов преобразователя.....	29
4 РАСЧЁТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ.....	33
4.1 Выбор системы автоматического управления	33

4.2	Разработка функциональной схемы.....	36
4.3	Разработка структурной схемы	38
4.4	Базовые величины электропривода в относительных единицах	39
4.5	Расчёт контура тока якоря	40
4.6	Расчёт контура скорости	43
4.7	Расчёт задатчика интенсивности.....	45
4.8	Расчёт напряжений ограничения регулятора мощности	47
4.9	Расчёт ограничения di/dt	47
4.10	Расчёт системы возбуждения.....	48
5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБРАННОГО ВАРИАНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	55
5.1	Капитальные затраты.....	55
5.2	Расчёт эксплуатационных расходов	56
5.3	Приведенные затраты	58
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	59
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	61
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	64
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	65
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	66
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	67
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	68

ВВЕДЕНИЕ

Рост производства горячекатаных, стальных бесшовных труб большого диаметра является одним из приоритетных направлений мировой и отечественной трубной промышленности.

Характерной чертой технологического процесса трубопрокатного производства в настоящее время является применение научно – технических достижений в области автоматизированного электропривода систем автоматического регулирования, устройств вычислительной техники и логического управления. При этом обеспечивается рост качества выпускаемых труб (прокатка с минусовыми допусками при получении заданной точности геометрических размеров по наружному диаметру, толщине стенки, обеспечении минимальной продольной и поперечной разнотолщинности готовой трубы).

Техническое перевооружение и реконструкция уже действующего и отлаженного производства является наиболее эффективным способом достижения заданных показателей по увеличению роста производства трубной продукции при наименьших капитальных затратах.

Реконструкция существующего в настоящее время трубопрокатного производства горячекатаных бесшовных труб диаметром до 325 мм в цехе Т – 1 АО «Северский трубный завод» заключается в дооснащении его комплектом нового трубопрокатного оборудования.

В состав комплекта входят: 7-ми клетевой непрерывный стан с прокаткой на удерживаемой отправке, 3-х клетевой калибровочно-вытяжной стан.

Результатом реконструкции является расширение диапазона геометрических размеров прокатываемых труб – получение трубы с диаметром до 325 мм и толщиной стенки до 25 мм.

Темой выпускной квалификационной работы является разработка автоматизированного электропривода калибровочно-вытяжного стана

трубопрокатного агрегата – 350 на базе научно – технических разработок в области силовой образовательной техники и унифицированных систем подчиненного регулирования координат электроприводов постоянного тока с двузонным управлением.

Объектом исследования выпускной квалификационной работы является электрооборудование главного калибровочно-вытяжного стана трубопрокатного агрегата.

Предметом исследования является главный привод калибровочно-вытяжного стана трубопрокатного агрегата.

Цель работы – разработать главный привод калибровочно-вытяжного стана трубопрокатного агрегата.

Задачи выпускной квалификационной работы:

1. Описать технологический процесс.
2. Выбрать подходящий электропривод.
3. Рассчитать мощность электродвигателя.
4. Проверить электродвигатель на нагрев.
5. Проверить электродвигатель по перегрузочной способности.
6. Выбрать преобразовательный агрегат.
7. Рассчитать систему автоматического управления.
8. Выбрать параметры регуляторов.
9. Произвести технико-экономическое обоснование проекта.

1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1 Описание технологического процесса трубопрокатного агрегата ТПА – 350

Трубопрокатный агрегат ТПА – 350 предназначен для производства горячекатаных труб общего назначения, труб высокого давления, заготовок для трубоволоочильных цехов и цеха геологоразведочных труб из углеродистых и легированных марок стали диаметром 146 – 325 мм, толщиной стенки 7 – 25 мм. Максимальная длина готовых труб 26 м.

Заготовкой для производства труб является отливаемый в мартеновском цехе завода стальной многогранный полнотелый слиток диаметром 450 – 510 мм, длиной 1120 – 2100 мм, массой 1600 – 3200 кг. Нагрев заготовки в кольцевых печах, куда они поступают с помощью загрузочной машины, производится до температуры 1100 – 1250 С°, труба выдается на отводящий рольганг, далее производится раскатка стакана на элонгаторе. Прокатка толстостенной трубы производится на пильгер-станах.

1.1.1 Технологический процесс прокатки в пильгер-станах

Слитки со склада электрическим мостовым краном передаются на участок загрузки двух кольцевых печей с вращающимся подом.

Каждый слиток помещается на устройство транспортировки слитков, откуда слиток рольгангом подается к весам для взвешивания слитков (рисунок 1). После весов слиток поступает на поворотный стол, откуда загрузочным рольгангом подается в одну из кольцевых печей (рисунок 2).



Рисунок 1 – Измерение длины и веса заготовки

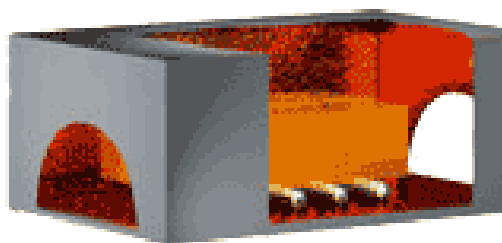


Рисунок 2 – Нагрев заготовки в печи

После нагрева слиток по рольгангу выгрузателя печи подается к поворотному столу на выгрузке, от которого транспортным устройством подается к прошивному прессу усилием 20кН для прошивки слитка в толстостенную гильзу (стакан) с донышком (рисунок 3).

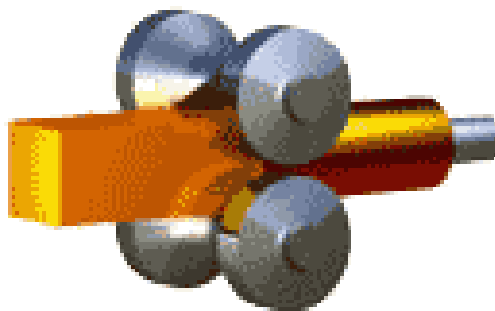


Рисунок3 – Прошивка заготовки

После повторного (если необходимо) нагрева в подогревательной печи (имеющей рольганг загрузателя и выгрузочный рольганг). Гильзу раскатывают на стане поперечно-винтовой прокатки (элонгаторе) на

короткой оправе (рисунок 4). При этом прошивается донышко устраняется разнотолщинность и гильза удлиняется.

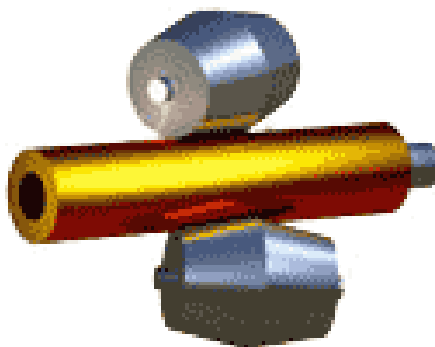


Рисунок 4 – Раскатка гильзы на стане – элонгаторе

На отводящем от элонгатора рольганге в гильзу вводят предварительно смазанную (мазутом с графитом) цилиндрическую оправу (дорн).

Гильза с дорном с помощью шлеппера подается в приемный желоб перед одной из двух клеток пыльгер-стана. Задний конец дорна закрепляется в подающе-поворотном механизме, после чего дорн вместе с гильзой задается в валки пыльгерной сети. В рабочей клетки пыльгер-стана размещены два непрерывно вращающихся вала (один – по часовой стрелке, другой – против). Валики вращаются в направлении, обратном направлению подачи гильзы. При вращении валков размеры калибра в свету непрерывно меняются, и профиль калибра за полный оборот валков является переменным.

При максимальном радиусе ручья валики образуют холостой калибр, и происходит раскрытие зева валков. Размеры холостого калибра больше диаметра гильзы, и в этот момент гильза вместе с дорном продвигается подающим аппаратом на величину подачи, одновременно с поворотом гильзы на 90° . При дальнейшем вращении валков размеры калибра постепенно уменьшаются, и валики начинают производить обжатие, которое возрастает с уменьшением радиуса ручья. Валики отжимают захваченный кольцеобразный участок гильзы в направлении их вращения, а гильзы вместе

с дорном перемещается назад. К концу прокатки упор подающего механизма подходит почти вплотную к валкам, но задний конец гильзы оказывается непрокатанным.

1.1.2 Технологическая схема дальнейшей прокатки труб

Технологическая схема дальнейшей прокатки труб состоит из следующих действий:

1. Снятие толстостенной трубы – заготовки с дорна пильгер – стана при помощи трайб – аппарата.
2. Обрезка «затравочного» конца пильгерной «головки» и разрезка трубы (стенка 19-35 мм) на части на устройство огневой резки.
3. Передача полученных гильз на приемный рольганг нагревательных печей.
4. Нагрев гильз в нагревательных печах.
5. Выгрузка из печи и передача гильзы на отводящий рольганг.
6. Подача гильзы переключателем на стол загрузки, где гильза одевается на оправку (внестановая зарядка гильз).
7. Передача гильзы оправкой на линию непрерывного стана, где задний конец оправки попадает в захват механизма удержания оправки (МУО), задача гильзы в непрерывный стан, прокатка в непрерывном стане (рисунок 5).

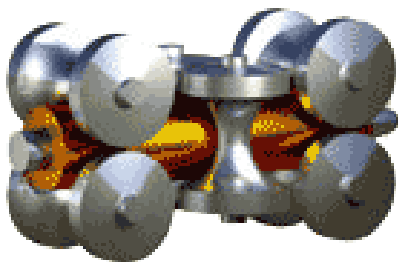


Рисунок 5 – Прокатка на непрерывном стане с удерживаемой оправкой

8. Стягивание трубы с оправки 3-х клетевым калибровочно-вытяжным станом (рисунок 6).

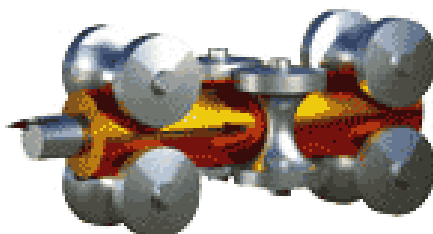


Рисунок 6 – Прокатка на калибровочном стане и извлечение оправки

9. Прокатка трубы в 12-ти клетевом калибровочном стане.

10. Резка трубы на мерные длины на участке резки с 2 пилами горячей резки (рисунок 7).

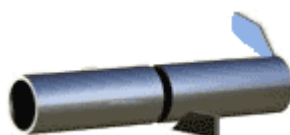


Рисунок 7 – Резка трубы на мерные длины

11. Охлаждение труб в холодильниках (рисунок 8).

12. Передача труб в отделение отделки труб, в котором дополнительно устанавливается правильная машина и трубообразные станки.



Рисунок 8 – Охлаждение труб

Далее трубы проходят операции отделки в зависимости от их назначения на участке отделки.

На участке нагревательных печей установлено 8 индивидуальных нагревательных печей мощностей 2500 кВт, 1000 Гц.

Для загрузки-выгрузки гильз установлено по 2 передаточные тележки.

1.2. Устройство и характеристика калибровочно-вытяжного стана

Калибровочно-вытяжной стан предназначен для снятия трубы с оправки и частичной калибровки труб после непрерывного стана.

Калибровочно-вытяжной стан состоит из тех последовательно расположенных клеток. Клетки двухвалковые с идеальным диаметром валков 480 мм. Каждая клетка приводится во вращение от индивидуального электродвигателя через редуктор. Коэффициент полезного действия редуктор – 0,9. Вращение от редуктора к рабочим валкам клетки передается универсальными шарнирными шпинделями.

Рабочие клетки калибровочно-вытяжного стана установлены под углом 45° к горизонту, то есть от рабочих валков с соседних клеток составляют угол 90° . Такое расположение валков обеспечивает при прокатке трубы действие деформирующих усилий в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Стальные литые станины рабочих клеток стана сделаны в виде разъемных коробок с проемами для подушек рабочих валков. Установка рабочих валков по высоте осуществляется нажимными винтами, которые приводятся во вращение вручную. По оси валки регулируются рычажно-винтовыми устройствами, расположенными на подушках с не приводной стороны клетки. Максимальная длина прокатываемой трубы равна 26 м.

К двигателям клеток пристраиваются тахогенераторы и центробежные реле. Питание двигателей от индивидуальных тиристорных преобразователей. Регулирование скорости вращения в пределах 315-1000 об/мин. Осуществляется ослабление поля по блочной схеме ТП-Д с двузонной САР частоты вращения. Режим работы двигателей длительный, неперевосимый, с перемежающимся приложением нагрузки.

Управление электроприводом калибровочно-вытяжного стана (задание и коррекция скоростных режимов, цифровая индикация фактической скоростной настройки) производится от общего микропроцессора УЗС – Н.

Для повышения уровня сигнала ОС по току предусмотрена замена шунтов, установленных КТЭ.

1.3. Требование к главному электроприводу калибровочно-вытяжного стана

Главной особенностью прокатки труб на калибровочно-вытяжном стане является движение трубы только в направлении прокатки и одновременное нахождение ее в нескольких клетях.

Основное условие непрерывной прокатки труб поддержание постоянства секундных объемов металла в валках клетей. Требуется одновременная и согласованная настройка всех клетей с таким расчетом, чтобы скорость металла при выходе из одной клетки и при выходе в другую была постоянной.

Электропривод стана должен:

1. Создать надежную и экономичную конституцию, удовлетворяющую назначению стана и конкретным условиям, его установки уже в цехе завода.
2. Обеспечить прокатку труб заданного сортамента с требуемыми показателями их качества и технико-экономической эффективности всего технологического процесса.
3. Удовлетворять требования эксплуатации в части обслуживания оборудования.

Исходя из сказанного, можно сформулировать требования к электроприводу КВС:

1. Привод реверсивный, но по условиям прокатки реверс не требуется.
2. Главный разгон вхолостую всех двигателей.
3. Заданная точность поддержания скорости вращения двигателей – 10% в статических режимах.

4. При аварийном отключении непрерывного стана и в случае нахождения в это время трубы в обоих станах, двигателя клеток калибровочно-вытяжного стана должны отключаться и тормозиться.
5. Пределы регулирования скорости вращения двигателя 315-1000 об/мин.
6. Аварийное торможения- рекуперативное.
7. Питание цепей возбуждения каждого двигателя осуществляется от отдельных тиристорных возбудителей в составе КТЭ 1000/440-532-2ВТМ-УХЛ4.

2 ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1 Выбор типа электропривода

При разработке главного привода калибровочно-вытяжного стана одним из наиболее ответственных вопросов является выбор типа привода, так как он предопределяет конструкцию стана и ряд его важнейших технико-экономических показателей.

Для упрощения кинематики системы, создания требуемого скоростного режима при различных сортаментах труб, для поддержания постоянства заданной скорости в статических и динамических режимах выбран индивидуальный привод клетей, который имеет преимущество перед групповым, так как позволяет отказаться от сложных дифференциальных редукторов, обеспечивают прокатку труб широкого диапазона, как по диаметру, так и по толщине стенки.

Для каждой клетки установлен двигатель, который подключен к сети через тиристорный преобразователь. Для увеличения диапазона регулирования скорости якорная обмотка и обмотка возбуждения подключены к регулируемому источнику постоянного тока.

По технологии процесса реверс не требуется, но он может быть необходим для быстрого восстановления скорости при сбросе нагрузки, а так же при наладке и в аварийных ситуациях, поэтому привод выбираем реверсивный с изменением направления тока якоря. Силовая часть электропривода выбрана по системе ТП – Д.

Применяются комплектные тиристорные электроприводы (КТЭ), в состав которых входят:

1. Электродвигатель постоянного тока.
2. Тиристорный преобразователь с силовым трансформатором.
3. Система управления и регулирования.
4. Устройство защиты.

5. Коммутационная аппаратура.

Также для главного привода калибровочно-вытяжного стана предусмотрено применение резервных тиристорных преобразовательных агрегатов, используемых в схеме горячего резервирования. Задание скоростного режима электропривода осуществляется устройством задания скорости (УЗС).

В КТЭ предусмотрена замена шунтов для повышения уровня ОС по току.

2.2 Расчёт мощности электродвигателя

Расчёт мощности электродвигателя производим по моментам прокатки для более тяжело прокатываемого сорта труб.

Исходными данными для расчета являются: статический момент прокатки, приведенный к валу двигателя, время прокатки в клети (одинаковое для всех клетей), время цикла, момент холостого хода.

В таблице 1 приведены исходные данные для расчета трубы 325 мм * 12,4 мм * 26,0 м.

Таблица 1 -Исходные данные для расчета трубы 325 мм * 12,4 мм * 26,0 м

Скорость вращения валков об/мин	Статический момент прокатки кНм	Статический момент прокатки, приведённый к валу двигателя	Время прокатки в клети	Время цикла
95-128	39	13,8	6,7	28,6
100-129	39	13,8	6,7	28,6
105-130	39	13,8	6,7	28,6

Статический момент прокатки, приведенный к валу двигателя при $\omega_{дв}=33$ рад/с:

$$M_{п} = \frac{M}{u \cdot \eta} = \frac{39 \cdot 10^3}{3,13 \cdot 0,9} = 13,8 \text{ кНм},$$

где M – статический момент прокатки, кНм;

u – передаточное число редуктора, принято одинаковым для всех клеток;

η – КПД редуктора.

Время холостого хода:

$$\tau_x = \tau_{\text{ц}} - \tau_{\text{п}} = 28,6 - 6,7 = 21,9 \text{ с},$$

где $\tau_{\text{п}}$ – время прокатки, с;

$\tau_{\text{ц}}$ – время цикла, с.

Эквивалентный момент, приведенный к валу двигателя:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_x^2 \cdot \tau_x + M_{\text{п}}^2 \cdot \tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{ц}}}} = \sqrt{\frac{0,975^2 \cdot 21,9 + 13,8^2 \cdot 6,7}{28,6}} = 6,7 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $M_x, M_{\text{п}}$ – данные завода изготовителя механооборудования, кНм;

τ_x – время х.х., с.;

$\tau_{\text{п}}$ – время паузы, с.;

$\tau_{\text{ц}}$ – время цикла, с.

Угловая скорость вращения двигателя:

$$n_{\text{дв}} = \omega_{\text{вр.вал}} \cdot u = 100 \cdot 3,13 = 313 \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

где u – передаточное число редукторов, принято одинаковым для всех клеток;

$\omega_{\text{вр.вал}}$ – частота вращения вала, рад/с.

Частота вращения двигателя:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{n_{\text{дв}} \cdot \pi}{30} = \frac{313 \cdot 3,14}{30} = 32,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

где $n_{\text{дв}}$ – угловая скорость вращения двигателя, об/мин.

Рассчитаем мощность электродвигателя, необходимую для привода валков клеток калибровочно-вытяжного стана:

$$P_{\text{дв}} = 1,4 \cdot 6,7 \cdot 10^3 \cdot \omega_{\text{дв}} = 1,4 \cdot 6,7 \cdot 10^3 \cdot 32,7 = 306,7 \text{ кВт},$$

где 1,4 – коэффициент запаса;

$M_{\text{э}}$ – эквивалентный момент, приведенный к валу двигателя, кНм;

$\omega_{\text{дв}}$ – частота вращения двигателя, рад/с.

Для привода калибровочно-вытяжного стана выбирается электродвигатель типа П2ПМ-500-144-УЗ:

- мощность электродвигателя	$P_{\text{дв.н}}=315 \text{ кВт};$
-напряжение двигателя номинальное	$U_{\text{дв.н}}=440 \text{ В};$
-ток двигателя номинальный	$I_{\text{дв.н}}=790 \text{ А};$
-угловая скорость номинальная	$n_{\text{дв.н}}= 315 \text{ об/мин};$
-угловая скорость максимальная	$n_{\text{дв.мах}}= 1000 \text{ об/мин};$
-частота вращения номинальная	$\omega_{\text{дв}} = \frac{n_{\text{дв}} \cdot \pi}{30} = \frac{315 \cdot 3,14}{30} = 33 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$
-частота вращения максимальная	$\omega_{\text{дв.мах}} = 105 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$
-перегрузка по току при $\omega_{\text{дв.н}}$	$\lambda_{\text{н}} = 2,5;$
- перегрузка по току при $\omega_{\text{дв.мах}}$	$\lambda_{\text{мах}} = 2.$

В целях унификации оборудования мощности всех трех электродвигателей стана выбираем одинаковыми.

2.3 Проверка двигателя на нагрев

На основании расчета строим нагрузочную диаграмму и тахограмму. Проверку на нагрев производим по эквивалентному моменту:

$$M_{\text{н}} > M_{\text{э}};$$

$$9,6 \text{ кН} \cdot \text{м} > 6,7 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент электродвигателя по данным электродвигателя, кНм;

$M_{\text{э}}$ – эквивалентный момент, приведенный к валу двигателя, кНм.

Загрузка двигателя эквивалентным моментом:

$$\frac{M_{\text{э}}}{M_{\text{н}}} \cdot 100 = \frac{6,7}{9,6} \cdot 100 = 69,8\%,$$

где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент электродвигателя по данным электродвигателя, кНм;

$M_{\text{э}}$ – эквивалентный момент, приведенный к валу двигателя, кНм.

Определим запас двигателя по нагреву:

$$M_t = 100 - \frac{M_{\text{э}}}{M_{\text{н}}} \cdot 100 = 100 - 69,8 = 30,2\%,$$

где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент электродвигателя по данным электродвигателя, кНм;

$M_{\text{э}}$ – эквивалентный момент, приведенный к валу двигателя, кНм.

Таким образом, выбранный электродвигатель удовлетворяет по условиям нагревания.

2.4 Проверка двигателя по перегрузочной способности

Допустимый момент электродвигателя:

$$M_{\text{доп}} = \lambda_{\text{н}} \cdot M_{\text{н}} = 2,5 \cdot 9,6 = 24 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $\lambda_{\text{н}}$ – перегрузка по току при $\omega_{\text{дв.н}}$;

$M_{\text{н}}$ – номинальный момент электродвигателя по данным электродвигателя, кНм.

Проверку по перегрузочной способности производим по статическому моменту прокатки, приведенному к валу двигателя:

$$M_{\text{доп}} > M_{\text{п}};$$

$$24 \text{ кН} \cdot \text{м} > 13,87 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $M_{\text{п}}$ – статический момент прокатки, приведенный к валу двигателя (при $\omega_{\text{дв}} = 33 \text{ рад/с}$), кНм;

$M_{\text{доп}}$ – допустимый момент электродвигателя, кНм.

Таким образом, двигатель удовлетворяет требованиям по перегрузке.

2.5 Расчет момента двигателя с учетом ослабления поля

Расчет производится для максимальной скорости прокатки для каждого сортамента труб. Для трубы 325 мм * 12,4 мм * 26 м эффективный момент прокатки, с учетом ослабления поля:

$$M' = M_{\text{п}} \cdot \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{н}}} = 13,8 \cdot \frac{400}{315} = 17,5 \text{ кНм},$$

где n_{\max} – максимальная угловая скорость для трубы 325 мм * 12,4 мм * 26 м, об/мин;

n_n – угловая скорость номинальная, об/мин.

Проверим по перегрузочной способности:

$$M_{\text{доп}} = \lambda_{\max} \cdot M_n = 2 \cdot 9,6 = 19,2 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где λ_{\max} – перегрузка по току при $\omega_{\text{дв.мах.}}$;

M_n – номинальный момент электродвигателя по данным электродвигателя, кНм.

$$M_{\text{доп}} > M';$$

$$19,2 \text{ кНм} > 17,5 \text{ кНм}.$$

Двигатель удовлетворяет требованиям по перегрузке в режиме работы при ослаблении поля.

2.6 Расчет коэффициента загрузки двигателя статическим моментом прокатки

Расчётная формула:

$$K_c = \frac{M'}{M_n},$$

где M' – эффективный момент прокатки, с учетом ослабления поля, кНм.

Все полученные расчетные данные сведены в приложении А.

2.7 Технические данные двигателя

Тип П2ПМ – 500 – 144 – УЗ

Технические данные двигателя:

- номинальная мощность	$P_{\text{дн}} = 315 \text{ кВт};$
- номинальное напряжение	$U_{\text{дн}} = 440 \text{ В};$
- номинальный ток	$I_{\text{дн}} = 790;$
- частота вращения номинальная	$n_{\text{д.н}} = 315 \text{ об/мин};$
- частота вращения максимальная	$n_{\text{д.мах}} = 1000 \text{ об/мин};$

- момент двигателя	$M_{дн} = 9,6 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м};$
- момент при ослабленном поле	$M_{д2} = 3,01 \cdot 10^3;$
- рабочая перегрузка по току при:	
$n_{д.н}$	$\lambda_{рн} = 2,5;$
$n_{д.мах}$	$\lambda_{ро} = 2;$
- напряжение возбуждения	$U_{вн} = 110 \text{ В};$
- ток возбуждения номинальный	$I_{вн} = 45,2 \text{ А};$
- ток возбуждения минимальный	$I_{в. мин.} = 8,7 \text{ А};$
- поток одного полюса номинальный	$\Phi_{н} = 15,43 \cdot 10^{-2} \text{ Вб};$
- поток одного полюса минимальный	$\Phi_{мин} = 0,0049 \text{ Вб};$
- сопротивление обмотки якоря ($t = 15 \text{ С}$)	$R_{я} = 0,01926 \text{ Ом};$
- сопротивление добавочных полюсов	$R_{дп} = 0,00427 \text{ Ом};$
- сопротивление компенсационной обмотки	$R_{ко} = 0,0011 \text{ Ом};$
- сопротивление обмотки возбуждения	$R_{ов} = 1,525 \text{ Ом};$
- момент инерции двигателя	$J_{дв} = 47,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$
- число витков обмотки возбуждения	$\omega_{в} = 345;$
- число активных проводников	$N = 248;$
- диаметр якоря	$D_{я} = 0,59 \text{ м};$
- индуктивность якоря	$L_{я} = 0,43 \text{ мГн};$
- величина воздушного зазора	$\delta = 0,4 \text{ мм};$
- число пар полюсов	$2p = 4;$
- число параллельных ветвей	$a = 2;$
- коэффициент для компенсированного двигателя	$k = 0,2;$
- падение напряжения на щетках	$U_{щ} = 2 \text{ В};$
- температурный коэффициент	$k_T = 1,4;$
- скорость изменения производной тока якоря	$\frac{dI_{я}}{dt} = A/c;$
- угловая скорость двигателя:	

номинальная:

$$\omega_{дв} = \frac{\pi \cdot n_{дн}}{30} = \frac{3,14 \cdot 315}{30} = 33 \frac{\text{рад.}}{\text{с.}},$$

где $n_{дв}$ частота вращения номинальная, об./мин;

максимальная:

$$\omega_{д.мах} = \frac{\pi \cdot n_{д.мах}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 105 \text{ рад./с},$$

где $n_{д.мах}$ – частота вращения максимальная, об./мин.

- сопротивление якорной цепи двигателя при рабочей температуре:

$$R_{яд} = k(R_{я} + R_{дп} + R_{ко}) = 1,4 \cdot (0,01965 + 0,00427 + 0,0011) = 0,035 \text{ Ом},$$

где k – температурный коэффициент, учитывающий изменение сопротивления при нагреве до рабочей температуры;

$R_{я}$ – сопротивление обмотки якоря ($t = 15 \text{ C}$);

$R_{дп}$ – сопротивление добавочных полюсов, Ом;

$R_{ко}$ – сопротивление компенсационной обмотки, Ом.

ЭДС двигателя номинальная:

$$E_{дн} = U_{дн} - I_{дн} \cdot R_{яд} - U_{щ} = 440 - 790 \cdot 0,035 - 2 = 410,33 \text{ В},$$

где $U_{дн}$ – номинальное напряжение В;

$I_{дн}$ – номинальный ток, А;

$R_{яд}$ – сопротивление якорной цепи двигателя при рабочей t , Ом;

$U_{щ}$ – падение напряжения на щетках, В.

- индуктивность якорной цепи двигателя:

$$L_{д} = \frac{U_{дн}}{I_{дн} \cdot \omega_{дн} \cdot 2p} = 1,4 \cdot \frac{440}{790 \cdot 33 \cdot 4} = 1,69 \cdot 10^{-3},$$

где k – температурный коэффициент, учитывающий изменение сопротивления при нагреве до рабочей температуры;

$U_{дн}$ – номинальное напряжение, В;

$I_{дн}$ – номинальный ток, А;

$\omega_{дн}$ – номинальная угловая скорость двигателя, рад/с;

p – число пар полюсов.

- сопротивление ошиновки:

$$R_{ш} = 0,1 \cdot R_{яд} = 0,1 \cdot 0,035 = 0,0035 \text{ Ом},$$

где $R_{яд}$ – сопротивление якорной цепи двигателя при рабочей t , Ом.

- электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя:

$$T_d = \frac{L_d}{R_{яд} + R_{ш}} = \frac{1,69 \cdot 10^{-3}}{0,035 + 0,0035},$$

где L_d – индуктивность якорной цепи двигателя, Гн;

$R_{яд}$ – сопротивление якорной цепи двигателя при работе, Ом;

- вторая постоянная времени цепи возбуждения:

$$T_{в2} = \frac{T_k \cdot T_s}{T_{в1}} = \frac{0,04 \cdot 0,165}{1,3} = 0,005 \text{ с},$$

где T_k – постоянная времени вихревых токов принята, с;

T_s – постоянная времени потока рассеяния, с;

$T_{в1}$ – усредненная постоянная времени цепи возбуждения, с.

3. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

3.1 Выбор преобразователя для питания двигателей главного привода

В состав комплектного тиристорного электропривода входят: преобразовательный агрегат для питания двигателя (индивидуальный для каждого двигателя), силовой трансформатор, сглаживающий реактор, быстродействующий выключатель, тиристорный возбудитель для питания обмотки возбуждения.

В реверсивных преобразователях существует два способа управления: раздельное и совместное. Достоинствами раздельного управления являются: меньшие габариты, масса и стоимость, лучшее использование трансформатора, более высокий КПД коэффициент мощности и несмотря на то, что здесь более сложная система управления преобразователем в связи с наличием РНТ и ЛПУ, наличие уравнильных токов при себе в СИФУ и другие недостатки, в настоящее время применяются в основном преобразователи с раздельным управлением.

В двухкомплектных реверсивных преобразователях с раздельным управлением уравнильные токи отсутствуют и, поэтому используются встречно – параллельные схемы без уравнильных реакторов.

Включение и выключение вентильных комплектов производится подачей и снятием импульсов управления тиристорами соответствующего комплекта. Система управления ТП с раздельным управлением содержит логическое переключающее устройство, которое выдает сигналы запрета или разрешения комплектов.

Преобразователи с раздельным управлением содержат датчики наличия тока, которые выдают логические сигналы наличия тока якоря или каждого вентильного комплекта, если их ток превышает ток удержания одного тиристора.

3.2 Тиристорный преобразователь

КТЭ 1000/440 – 532 – 2ВТМ – УХЛ4

Тип трансформатора преобразовательного агрегата ТСЗП-630-10УЗ.

Технические данные на трансформатор:

- первичное напряжение $U_1 = 10 \text{ кВ};$
- вторичное напряжение $U_2 = 410 \text{ В};$
- ЭДС короткого замыкания $e_k = 6,1 \text{ } \%;$
- потери короткого замыкания $P_{кз} = 6000 \text{ Вт};$
- выпрямленный ток $I_{дн} = 1000 \text{ А};$
- выпрямленное напряжение $U_{дн} = 460 \text{ В};$
- напряжение управления, соответствующее ЭДС холостого хода преобразователя

$$U_y = 6 \text{ В};$$

- угол запаса при инвертировании $\delta = 10 \text{ эл.гр};$

- пульсность схемы $m = 6;$

- коэффициент выпрямления:

по напряжению $K_{BU} = 1,35;$

потоку $K_{Bi} = 0,815;$

- коэффициент снижения напряжения сети $k_c = 0,9;$

- угловая частота питающей сети:

$$\omega_c = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ рад/с},$$

где f – частота питающей сети, Гц.

- ЭДС холостого хода преобразователя ($a=0$):

$$E_{do} = K_{BU} \cdot U_2 = 1,35 \cdot 410 = 553,5 \text{ В},$$

где K_{BU} – коэффициент выпрямления по напряжению;

U_2 – вторичное напряжение, В.

- коэффициент передачи преобразователя по напряжению:

$$K_{тп} = \frac{E_{do}}{U_y} = \frac{553,5}{6} = 92,3,$$

где E_{do} – ЭДС холостого хода преобразователя ($a=0$), В;

U_y – напряжение управления, соответствующее ЭДС холостого хода преобразователя, В.

- сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке

индуктивное:

$$X = \frac{U_2 \sqrt{3} e_k}{K_{BI} \cdot I_{dN} \cdot 100} = \frac{410 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,1}{0,815 \cdot 1000 \cdot 10} = 0,053 \text{ Ом},$$

где U_2 – вторичное напряжение, В;

e_k – ЭДС короткого замыкания, %;

K_{BI} – коэффициент выпрямления по току;

$I_{дн}$ – выпрямленный ток, А.

активное:

$$R = \frac{P_{кз} (\sqrt{3})^2}{3 \cdot (K_{BI} \cdot I_{дн})^2} = \frac{6000 \cdot (\sqrt{3})^2}{3 \cdot (0,815 \cdot 1000)^2} = 0,00903 \text{ Ом},$$

где $P_{кз}$ – потери короткого замыкания, Вт;

K_{Bi} – коэффициент выпрямления по току;

$I_{дн}$ – выпрямленный ток, А.

- сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке эквивалентной звезды:

индуктивное:

$$X^* = \frac{X}{3} = \frac{0,053}{3} = 0,0117 \text{ Ом},$$

где X^* – индуктивное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке, Ом.

Активное:

$$R^* = \frac{R}{3} = \frac{0,00903}{3} = 0,00301 \text{ Ом},$$

где R^* – активное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке, Ом.

- эквивалентное сопротивление преобразователя:

$$R_{\text{экв}} = \frac{3}{\pi} \cdot X^* + 1,75 \cdot R^* = \frac{3}{3,14} \cdot 0,0177 + 1,75 \cdot 0,00301 = 0,022 \text{ Ом},$$

где X^* - индуктивное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке эквивалентной звезды, Ом;

R^* - активное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке эквивалентной звезды, Ом.

- индуктивность трансформатора:

$$L_{\text{тр}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{X^*}{\omega_c} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,0177}{314} = 0,0845 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где X^* - индуктивное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке эквивалентной звезды, Ом;

ω_c – угловая частота питающей сети, рад/с.

Тип сглаживающего реактора: ФРОС-250/0,5УЗ.

Индуктивность реактора $L_p = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$.

3.3 Двигатель с механизмом

Маховый момент механизма, приведенный к валу двигателя:

$$GD_{\text{мех}}^2 = 675 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции механизма:

$$J_{\text{мех}} = \frac{GD_{\text{мех}}^2}{4} = 168,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $GD_{\text{мех}}^2$ – маховый момент механизма, приведенный к валу двигателя, кг·м².

Момент инерции двигателя и механизма:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} = 47,8 + 168,6 = 216,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя, кг · м²;

$J_{\text{мех}}$ – момент инерции механизма, кг · м².

3.4 Двигатель с тиристорным преобразователем

Суммарное сопротивление якорной цепи:

$$R_a = R_{яд} + R_M + R_{экв} = 0,035 + 0,0035 + 0,022 = 0,0605 \text{ Ом},$$

где $R_{яд}$ – сопротивление якорной цепи двигателя при рабочей частоте, Ом;

R_M – сопротивление ошиновки, Ом;

$R_{экв}$ – эквивалентное сопротивление преобразователя, Ом.

Суммарная индуктивность якорной цепи:

$$L_a = L_d L_{тр} L_p = (1,69 + 0,0845 + 0,35) \cdot 10^{-3} = 2,12 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где L_d – индуктивность якорной цепи двигателя, Гн;

$L_{тр}$ – индуктивность трансформатора, Гн;

L_p – индуктивность реактора, Гн.

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи:

$$T_a \frac{L_a}{R_a} = \frac{2,12 \cdot 10^{-3}}{6,05 \cdot 10^{-2}} = 0,035 \text{ с},$$

где L_a – суммарная индуктивность якорной цепи, Гн;

R_a – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом.

3.5 Расчёт режимов преобразователя

Минимальный угол опережения при токе инвертирования $2I_{дн}$:

$$\beta_{\min} = \arccos \left(\cos \delta - \frac{2I_{дн} \cdot X^* \sqrt{3}}{K_c \sqrt{2 \cdot U_2 \sin \frac{2\pi}{m}}} \right) \approx \arccos \left(\cos 10^\circ - \frac{2 \cdot 790 \cdot 0,0177 \cdot \sqrt{3}}{0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot 410 \cdot \sin \frac{2\pi}{6}}} \right) = 28,68 \text{ эл. гр.},$$

где δ – угол запаса при инвертировании, эл.гр.;

$I_{дн}$ – номинальный ток двигателя, А;

X^* – индуктивное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке эквивалентной звезды, Ом;

K_c – коэффициент снижения напряжения сети;

U_2 – вторичное напряжение трансформатора β_{\min} .

$$E_n = E_{до} \cdot \cos \beta_{\min} = 553,5 \cdot 0,88 = 487,08 \text{ В},$$

где E_{do} – ЭДС холостого хода преобразователя, В;

β_{min} – минимальный угол опережения при токе инвертирования $2I_{дн}$,
эл.гр.;

Максимальный темп изменения тока в процессе разгона выше
основной скорости:

$$\left(\frac{dI_d}{dt}\right) = \frac{I_{дн} \cdot \omega_c}{\pi} = \frac{790 \cdot 20}{3,14} = 5032 \frac{A}{с},$$

где $I_{дн}$ – номинальный ток двигателя, А;

ω_c – частота среза контура скорости, рад/с.

Условие выполнения инвертирования:

$$E_{дн} + L_a \frac{di}{dt} < E_{п} \cdot \kappa_c;$$

$$410,33 + 2,12 \cdot 10^{-3} \cdot 5032 < 487,08 \cdot 0,9;$$

$$421 < 438,$$

где $E_{дн}$ – ЭДС двигателя номинальная, В;

L_a – суммарная индуктивность якорной цепи, Гн;

$E_{п}$ – ЭДС преобразователя, соответствующая β_{min} , В;

κ_c – коэффициент снижения напряжения сети.

ЭДС преобразователя, соответствующая α_{min} :

$$E_d = \frac{E_{дн} + 2 \cdot I_{дн} \cdot R_a}{0,9} = \frac{410,33 + 2 \cdot 790 \cdot 0,0605}{0,9} = 505,6В,$$

где $E_{дн}$ – ЭДС двигателя номинальная, В;

$I_{дн}$ – номинальный ток двигателя, А;

R_a – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом.

Минимальный угол управления в выпрямительном режиме:

$$\alpha_{min} = \arccos \frac{E_d}{E_{do}} = \arccos \frac{505,6}{553,5} = 24 \text{ эл. гр.},$$

где E_d – ЭДС преобразователя, соответствующая α_{min} , В;

E_{do} – ЭДС холостого хода преобразователя, В.

Угол управления, соответствующий работе привода с $E_{дн}$ и $I_{дн}$:

$$\alpha_n = \arccos \frac{E_{дн} + I_{дн} \cdot R_a}{E_{до}} = \arccos \frac{410 + 790 \cdot 0,0605}{553,5} = \frac{457,8}{553,5} = 34,2 \text{ эл. гр},$$

где $E_{дн}$ – ЭДС двигателя номинальная, В;

$I_{дн}$ – номинальный ток двигателя, А;

R_a – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом;

$E_{до}$ – ЭДС холостого хода преобразователя, В.

Закон изменения угла рассогласования:

$$\alpha = 90 - \kappa_\phi \cdot U_y,$$

где κ_ϕ – фазовый коэффициент, эл.гр./В;

U_y – напряжение управления, соответствующее ЭДС холостого хода, В.

Напряжение преобразователя при пилообразном опорном напряжении:

$$E_{д}^* = E_{до} \cdot \cos \alpha = E_{до} \cos(90^\circ - \kappa_\phi \cdot U_y) = E_{до} \cdot \sin(\kappa_\phi \cdot U_y) = 553,5 \cdot \sin(20 \cdot 6) = 497,3 \text{ В},$$

где $E_{до}$ – ЭДС холостого хода преобразователя, В;

α – закон изменения угла рассогласования, эл.гр;

κ_ϕ – фазовый коэффициент, эл.гр./В;

U_y – напряжение управления, соответствующее ЭДС холостого хода, В.

Напряжение управления, соответствующее α_{\min} :

$$U_{y1} = \frac{90^\circ - \alpha_{\min}}{\kappa_\phi} = \frac{90^\circ - 24^\circ}{20} = 3,3 \text{ В},$$

где α_{\min} – минимальный угол управления в выпрямительном режиме, эл.гр.;

κ_ϕ – фазовый коэффициент, эл.гр./В.

Напряжение управления, соответствующее α_n :

$$U_{y2} = \frac{90^\circ - \alpha_n}{\kappa_\phi} = \frac{90^\circ - 34,2^\circ}{20} = 2,79 \text{ В},$$

где α_{\min} – угол управления, соответствующий работе привода с $E_{дн}$ и $I_{дн}$, эл.гр.

Допустимое амплитудное значение пульсации тока якоря двигателя на максимальной скорости в % от номинального тока $i_{доп} = 7\%$ [5].

Амплитудное значение пульсации тока якоря при установленном реакторе в % от номинального тока:

$$i = \frac{\bar{E} \cdot E'' \cdot 100 \cdot \sqrt{2}}{L_a \cdot \omega_c \cdot m \cdot I_{дн}} = \frac{0,15 \cdot 553,5 \cdot 100 \cdot \sqrt{2}}{2,12 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot 6 \cdot 790} = 3,7\%,$$

где \bar{E} – эффективное значение первой гармоники пульсации напряжения в отношении к $E_{до}$ для $\alpha = 24$ эл.гр. и $m=6$, В;

$E_{до}$ – ЭДС холостого хода преобразователя, В;

L_a – суммарная индуктивность якорной цепи, Гн;

ω_c – частота питающей сети, рад/с;

m – пульсность схемы;

$I_{дн}$ – номинальный ток двигателя, А.

Так как $i_{доп} > I$ в применении дросселя для сглаживания пульсаций нет необходимости, и индуктивности L_a достаточно для ограничения пульсаций.

4. РАСЧЁТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ

4.1 Выбор системы автоматического управления

Основной задачей системы автоматического управления электроприводом является выполнение требований технологий, обусловленной картой проката. Основным требованием является поддержание заданной скорости вращения двигателя с точностью $\pm 10\%$ при номинальной скорости.

В настоящее время применяется унифицированная система управления и регулирования, построенная на использовании стандартных полупроводниковых блоков, регуляторов в сочетании с датчиками, позволяющими с высокой точностью контролировать все регулируемые координаты электропривода.

Любая замкнутая система регулирования должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Система должна быть устойчивой.
2. Погрешность в установившемся режиме не должна превышать заданной.
3. Система должна обеспечить необходимое качество переходных процессов.

Часто эти требования оказываются противоречивыми. В простейшей системе на вход преобразователя подается управляющее воздействие, пропорциональное разности между заданными и фактическими значениями входной величины. Но воздействие таких систем недостаточно, а статическая точность низка. Для улучшения качества регулирования необходимо увеличить коэффициент усиления системы, но тогда система становится неустойчивой. Увеличение коэффициента усиления до величины, обеспечивающий заданную статическую точность при приемлемом качестве

регулирования, достигается путем введения специальных корректирующих звеньев, изменяющих динамику системы в нужном направлении. При этом изменяется (уменьшается и даже устраняется) перерегулирование, увеличивается быстродействие.

В настоящее время различают три вида систем с тиристорным преобразователем:

1. Система с одним регулятором и нелинейной обратной связью по току. Такая система наиболее проста, так как требуется один регулятор, на вход которого поступают сигналы рассогласования между заданным и действительным значением регулируемого параметра. При токе меньше заданного значения система работает как регулятор скорости или регулятор ЭДС, а при повышении тока – как регулятор тока.

2. Система с независимым регулированием или система параллельного действия. В таких системах возможна отдельная настройка каждого контура регулирования величины, учитывающих разницу в передаточных функциях объекта регулирования. Это дает получение оптимальных переходных процессов. Эта система удовлетворяет требованиям электропривода в отношении динамики, но настройка и расчет такой системы представляют значительные затруднения, а в связи с этим уменьшается надежность системы.

3. Многоконтурная система с подчиненным регулированием. Система построена по принципу многоконтурного регулирования. Каждый контур имеет свой регулятор, настраиваемый в соответствии с передаточной функцией объекта регулирования этого контура. На вход каждого контура поступают сигналы, задающие действительные значения регулируемых параметров, причем предыдущее звено вырабатывает сигнал задания для последующего регулятора. Способ подчиненного регулирования позволяет легко осуществить расчет и наладку системы.

Достоинства третьей системы:

1. Простота синтеза системы с любым числом регулируемых параметров.
2. Возможность ограничения регулируемых величин на заданном уровне.
3. Возможность получения оптимальных законов управления каждым параметром.
4. Малая мощность цепи управления.
5. Значительное уменьшение стоимости и сокращении расходов, сроков проектирования, монтажа оборудования.
6. Высокая эксплуатационная надежность и простота обслуживания.

Исходя из вышесказанного, принимаем для главного привода калибровочно-вытяжного стана систему ТП-Д с подчиненным регулированием параметров.

В качестве регулируемых параметров можно выделить скорость и ЭДС двигателя, ток якоря двигателя и ток обмотки возбуждения.

Напряжение на выходах регуляторов являются заданием для последующего контура регулирования. Регулирование скорости до основной производится изменением напряжения якоря, а в диапазоне выше основной – за счет изменения тока возбуждения при номинальной ЭДС двигателя. Регулирование проводится путем последовательной оптимизации контуров начиная с внутреннего. Под оптимальной настройкой понимается технически оптимальная система – компромиссная между перерегулированием и быстродействием системы.

На практике используют настройку регулятора $T_i=2T_1$. Данный вариант носит название настройка системы модульный или технический оптимум.

Настройка на модульный оптимум – полная компенсация большой постоянной времени объекта регулирования. Такая настройка служит определенным стандартом оптимальным решениям, сочетающим высокое

быстродействие с относительно малым перерегулированием. Данная настройка обеспечивает так называемый нормированный или стандартный процесс.

Выбираем настройку на модульный оптимум.

4.2 Разработка функциональной схемы

Для автоматического управления главным приводом калибровочно-вытяжного стана принимаем систему с двузонным регулированием скорости. двузонная система регулирования скорости выбрана в связи с тем, что прокатка некоторых сортов труб ведется на скорости выше основной, то есть при ослабленном потоке.

Поскольку частота вращения двигателя – основной параметр, то контур регулирования частоты вращения будет внешним, а контур регулирования тока – внутренним

Система управления возбуждением – одноконтурная. До номинальной скорости регулятора ЭДС работает как регулятор тока возбуждения, а при скорости выше номинальной – как регулятор ЭДС двигателя. Во всем диапазоне регулирование частоты вращения двигателя осуществляется изменением одного сигнала – задание по скорости.

Функциональная схема управления электропривода стана представлена в приложении Б.

Описание схемы

На вход регулятора скорости через задатчик интенсивности (ЗИ) и промежуточный усилитель ПУ1 подается сигнал задания частоты вращения от УЗС. ЗИ преобразует ступенчатый сигнал задания скорости в плавно изменяющийся. Скорость изменения выходного напряжения ЗИ определяется выходным напряжением ЗИ1, которое определяется величиной ограничения.

Регулятор скорости реализует пропорциональный закон регулирования. В цепи обратной связи по скорости ставится фильтр для уменьшения влияния пульсаций тахогенератора.

Двигатель постоянного тока является нелинейным объектом регулирования. Для компенсации нелинейности объекта регулирования при изменении потока возбуждения в системе регулирования скорости между регулятором скорости и регулятором тока должен быть установлен делительный элемент, реализующий зависимость $i_3 = \frac{m_3}{\varphi}$. Выходное напряжение делительного устройства $U_{\text{вых}} = xy : z$, x , y , z – входы ячейки делительного устройства. В схеме на вход z подается сигнал, пропорциональный потоку, так что осуществляется деление на величину, пропорциональную потоку двигателя. С делительного элемента сигнал подается на регулятор мощности. Регулятор мощности имеет пропорциональную структуру. В обратной связи РМ включено регулируемое ограничение, с помощью которого устанавливается величина допустимого тока двигателя, так как уставкатокоограничения снижается с увеличением скорости выше основной.

Применение узла ограничения скорости нарастания тока вызвано тем, что применяются электродвигатели постоянного тока, которые имеют невысокую допустимую величину скорости нарастания тока, а уменьшение ее за счёт уменьшения частоты среза регулятора тока приведет к снижению быстродействия регулятора скорости, что крайне нежелательно.

Сигналы задания и действительного значений тока подаются через фильтры ФЗТ и ФОТ с постоянной времени T .

Выделение ЭДС двигателя осуществляется в схеме измерителем ЭДС (ИЭ).

Схема регулирования полем двигателя – одноконтурная. Это сделано с целью повышения быстродействия контура ЭДС и простоты настройки.

Здесь один регулятор возбуждения РВ – ПИ, который до номинальной скорости привода работает как регулятор тока возбуждения, а при скоростях привода выше номинальной работает как регулятор ЭДС.

Диодный дискриминатор VI и V2 выделяет больший из двух сигналов, тем обеспечивает замыкание обратной связи либо по току возбуждения, либо ЭДС.

Сигнал о действующем значении потока формируется на измерителе потока с помощью датчика тока возбуждения и звена, охваченного обратной связью через нелинейный элемент, имеющий характеристику, обратную кривой намагничивания.

На входе РВ при работе на повышенной скорости сравниваются сигналы задания ЭДС – $e_{ном}$ и сигнал $e_{дв}$, который перед поступлением на вход РВ проходит через схему выделения модуля, так как при изменении направления вращения полярность сигнала на входе РВ меняться не должна.

4.3 Разработка структурной схемы

На основании известных свойств тиристорного преобразователя и электродвигателя, а также с помощью выявленных на функциональных схемах взаимосвязей составим структурной схему.

При регулировании скорости до основной объект управления представлен двумя последовательного соединенными звеньями: апериодическим и интегрирующим. Вентильный преобразователь вместе с СИФУ представлен линейным пропорциональным звеном с коэффициентом передачи K_p .

При регулировании скорости выше основной двигатель постоянного тока может быть представлен нелинейным объектом регулирования.

Всю систему управления условно можно разделить на две части: систему управления скорости, управляемую напряжением тиристорного

преобразователя и систему регулирования ЭДС, управляемую полем двигателя.

Структурная схема приведена в приложении В

Передаточные функции регуляторов будут определены в процессе дальнейшего расчета САР из условия получения оптимальных свойств системы.

4.4 Базовые величины электропривода в относительных единицах

Напряжение главной цепи	$U_6 = E_{дн} = 410,33 \text{ В};$
Ток главной цепи	$I_6 = I_{дн} = 790 \text{ А};$
Сопротивление главной цепи	$R_6 = \frac{E_{дн}}{I_{дн}} = \frac{410,33}{790} = 0,52 \text{ Ом};$
Ток возбуждения	$I_{6в} = I_{вн} = 45,2 \text{ А};$
Сопротивление цепи возбуждения	$R_{6в} = K_v \cdot k = 1,525 \cdot 1,4 = 2,135 \text{ Ом};$
Напряжение возбуждения	$U_{6в} = I_{6в} \cdot R_{6в} = 45,2 \cdot 2,135 = 96,5 \text{ В};$
Угловая скорость	$\omega_6 = \omega_{дн} = 33 \text{ рад/с};$
Поток двигателя	$\Phi_6 = \Phi_n = 15,43 \cdot 10^{-2} \text{ Вб};$
Момент	$M_6 = M_{дн} = 9,6 \cdot 10^{-2} \text{ Нм};$
Напряжение системы регулирования	$U_0 = 10 \text{ В};$
Напряжение двигателя:	

$$\bar{U}_{дн} = \frac{U_{дн}}{U_6} = \frac{440}{410,33} = 1,072,$$

где $U_{дн}$ – номинальное напряжение, В;

U_6 – напряжение главной цепи, В.

Сопротивление якорной цепи двигателя с учетом ошиновки:

$$\bar{R}_д = \frac{R_{яд} + R_{ш}}{R_6} = \frac{0,03503 + 0,0035}{0,52},$$

где $R_{яд}$ – сопротивление якорной цепи двигателя при рабочей t , Ом;

$R_{ш}$ – сопротивление ошиновки, Ом;

R_6 – сопротивление главной цепи, Ом.

Суммарное сопротивление якорной цепи в относительных единицах:

$$\bar{R}_a = \frac{R_a}{R_6} = \frac{0,0605}{0,52} = 0,116,$$

где R_a – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом;

R_6 – сопротивление главной цепи, Ом.

Коэффициент усиления преобразователя: \bar{k}

$$\bar{k}_{\text{тп}} = k_{\text{тп}} \cdot \frac{U_0}{U_6} = 92,3 \cdot \frac{10}{410,33} = 2,28,$$

где $k_{\text{тп}}$ – напряжение управления, соответствующее α_{\min} ;

U_0 – напряжение системы регулирования, В;

U_6 – напряжение главной цепи, В.

Напряжение на выходе датчика тока при максимальном токе двигателя принимаем: $U_{\text{дтм}} = 10$ В.

Напряжение на выходе датчика тока при номинальном токе двигателя:

$$U_{\text{дтн}} = \frac{U_{\text{дтм}} \cdot I_{\text{дн}}}{\lambda_{\text{рн}} \cdot I_{\text{дн}}} = \frac{10 \cdot 790}{2,5 \cdot 790} = 3,16 \text{ В},$$

где $I_{\text{дн}}$ – номинальный ток двигателя, А;

$\lambda_{\text{рн}}$ – рабочая перегрузка по току при $n_{\text{дн}}$.

Передаточный коэффициент датчика тока:

$$\bar{k}_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{дтн}}}{U_0} = \frac{3,16}{10} = 0,316,$$

где $U_{\text{дтн}}$ – напряжение на выходе датчика тока при номинальном токе двигателя, В;

U_0 – напряжение системы регулирования, В.

Базовое сопротивление САР: $R_0 = 100 \cdot 10^3$ Ом.

4.5 Расчет контура тока якоря

Некомпенсированная постоянная времени контура тока: $T_\mu = 0,005$ с (по требованиям технологии).

Передаточная функция РТ якоря:

$$W_{PT} = \frac{\bar{R}_a \cdot (1 + T_a p)}{p_{\text{рост}} \cdot \bar{K}_{\text{дт}} \cdot 2T_{\mu} \cdot \bar{K}_{\text{ТП}}} = \frac{0,116 \cdot (1 + 0,035p)}{0,0228p} = \frac{1 + 0,035p}{0,196p},$$

где \bar{R}_a – суммарное сопротивление якорной цепи в относительных единицах;

T_a – электромагнитная постоянная времени якорной цеп, с;

$p_{\text{ост}}$ – проводимость по каналу ОС по току;

$\bar{K}_{\text{дт}}$ – передаточный коэффициент датчика тока;

$\bar{K}_{\text{ТП}}$ – коэффициент усиления преобразователя.

Коэффициент усиления пропорциональной части РТ:

$$r_T = \frac{\bar{R}_a \cdot T_a}{p_{\text{ост}} \cdot \bar{K}_{\text{дт}} \cdot 2T_{\mu} \cdot \bar{K}_{\text{ТП}}} = \frac{0,116 \cdot 0,035}{1 \cdot 0,01 \cdot 2,28} = 0,2,$$

где \bar{R}_a – суммарное сопротивление якорной цепи в относительных единицах;

T_a – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;

$p_{\text{ост}}$ – проводимость по каналу ОС по току;

$\bar{K}_{\text{дт}}$ – передаточный коэффициент датчика тока;

T_{μ} – некомпенсированная постоянная времени контура тока, с;

$\bar{K}_{\text{ТП}}$ – коэффициент усиления преобразователя.

Входная проводимость РТ по каналу задания:

$$\bar{p}_{\text{зт}} = \frac{\lambda_{\text{рн}} \cdot U_o}{U_{\text{дтм}}} = \frac{2,5 \cdot 10}{10} = 2,5,$$

где $\lambda_{\text{рн}}$ – рабочая перегрузка по току при $n_{\text{дн}}$;

U_o – напряжение системы регулирования, В;

$U_{\text{дтм}}$ – напряжение на выходе датчика тока при максимальной токе двигателя, В.

Сопротивление в цепи ОС РТ:

$$R_{17\text{расч}} = r_T \cdot R_o = 0,2 \cdot 100 \cdot 10^3 = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где r_T – коэффициент усиления пропорциональной части РТ;

R_o – базовое сопротивление САР, Ом.

Емкость в цепи ОС РТ:

$$C_{5\text{расч}} = \frac{T_a}{R_{17\text{расч}}} = \frac{0,035}{20 \cdot 10^3} = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{Ф},$$

где T_a – электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с;

$R_{17\text{расч}}$ – сопротивление в цепи ОС РТ, Ом.

Входное сопротивление регулятора по каналу ОС:

$$R_{3\text{расч}} = \bar{k}_{\text{дт}} \cdot R_0 = 0,44 \cdot 100 \cdot 10^3 = 44 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $\bar{k}_{\text{дт}}$ – передаточный коэффициент датчика тока;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом.

Сопротивление на входе РТ по цепи ОС по току:

$$R_{17}^* = R_{17\text{расч}} \cdot \frac{C_{5\text{расч}}}{C_5^*} = 20 \cdot 10^3 \frac{1,75 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 74,5 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{3\text{расч}}$ – входное сопротивление регулятора тока по каналу ОС, Ом;

$C_{5\text{расч}}$ – ёмкость в цепи ОС РТ, Ф;

C_5^* – принятая ёмкость в цепи ОС РТ, Ф.

Входное сопротивление РТ по каналу задания тока:

$$R_{2\text{расч}} = \frac{R_0}{\bar{p}_{\text{зт}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{2,5} = 40 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где R_0 – базовое сопротивление САР, Ом;

$\bar{p}_{\text{зт}}$ – входная проводимость РТ по каналу задания.

Сопротивление на входе РТ по каналу задания тока:

$$R_3^* = R_{3\text{расч}} \cdot \frac{C_{5\text{расч}}}{C_5^*} = 44 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,75 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 163,8 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{3\text{расч}}$ – входное сопротивление регулятора тока по каналу ОС, Ом;

$C_{5\text{расч}}$ – ёмкость в цепи ОС РТ, Ф;

C_5^* – принятая ёмкость в цепи ОС РТ, Ф.

Входное сопротивление РТ по каналу задания тока:

$$R_{2\text{расч}} = \frac{R_0}{\bar{p}_{\text{зт}}} = \frac{100 \cdot 10^3}{2,5} = 40 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где R_0 – базовое сопротивление САР, Ом;

$\bar{p}_{\text{зт}}$ – входная проводимость РТ по каналу задания.

Сопротивление на входе РТ по каналу задания тока:

$$R_2^* = R_{2\text{расч}} \cdot \frac{C_{5\text{расч}}}{C_5^*} = 40 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,75 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 148,93 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{2\text{расч}}$ – входное сопротивление РТ по каналу задания тока ОС, Ом;

$C_{5\text{расч}}$ – ёмкость в цепи ОС РТ, Ф;

C_5^* – принятая ёмкость в цепи ОС РТ, Ф.

Сопротивление в цепи ОС РТ:

$$R_{17}^* = R_{17\text{расч}} \cdot \frac{C_{5\text{расч}}}{C_5^*} = 20 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,75 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot 10^{-6}} = 74,5 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{17\text{расч}}$ – сопротивление в цепи ОС РТ, Ом;

$C_{5\text{расч}}$ – ёмкость в цепи ОС РТ, Ф;

C_5^* – принятая ёмкость в цепи ОС РТ, Ф.

Сопротивления, шунтирующие входное сопротивление регулятора тока, R_4 и R_5 подбираются при наладке для компенсации коэффициента преобразователя в зоне прерывистых токов.

Темп изменения тока якоря:

$$\frac{dI}{dt} = 10 \cdot 790 = 7900 \frac{\text{А}}{\text{с}}.$$

4.6 Расчёт контура скорости

Некомпенсируемая постоянная времени контура скорости:

$$T_\omega = 2(2T_\mu) + T_\phi = 2 \cdot (2 \cdot 0,005) + 0,005 = 0,025 \text{ с},$$

где T_ω – некомпенсированная постоянная времени, с;

T_ϕ – постоянная времени фильтра, с.

Механическая постоянная времени привода:

$$T_j = \frac{J \cdot \omega_6}{M_6} = \frac{216,4 \cdot 33}{9,6 \cdot 10^3} = 0,745 \text{ с},$$

где J – момент инерции двигателя и механизма, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

ω_6 – угловая скорость, базисная, рад/с ;

M_6 – момент базисный, Н·м.

Передаточный коэффициент тахогенератора:

$$K_{\text{ТГ}} = \frac{U_{\text{ТГ}}}{\omega_{\text{ТГ}}} = \frac{230}{105} = 2,1 \frac{\text{В}}{\text{с}},$$

где $U_{\text{ТГ}}$ – напряжение тахогенератора, В;

$\omega_{\text{ТГ}}$ – частота вращения тахогенератора, рад/с.

В качестве скорости принимаем тахогенератор: ТП-180-1П.

Напряжение датчика скорости при максимальной скорости принимаем:

$$U_{\text{дсmax}} = 10 \text{ В.}$$

Напряжение выхода датчика скорости при номинальной скорости:

$$U_{\text{дсн}} = \frac{U_{\text{дсmax}} \cdot \omega_{\text{дн}}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{10 \cdot 33}{105} = 3,1 \text{ В,}$$

где $U_{\text{дсmax}}$ – напряжение датчика скорости при максимальной скорости, В;

$\omega_{\text{дн}}$ – частота вращения двигателя номинальной, рад/с;

$\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{ТГ}}$ – частота вращения тахогенератора, рад/с.

Передачный коэффициент датчика скорости:

$$\bar{K}_{\text{дс}} = \frac{U_{\text{дсн}}}{U_o} = \frac{3,1}{10} = 0,31,$$

где $U_{\text{дсн}}$ – напряжение выхода датчика скорости при номинальной скорости, В;

U_o – напряжение системы регулирования, В.

Входная проводимость регулятора по каналу ОС:

$$\bar{p}_{\text{осс}} = \frac{1}{\bar{K}_{\text{дс}}} = \frac{1}{0,31} = 3,2,$$

где $\bar{K}_{\text{дс}}$ – передачный коэффициент датчика скорости.

Коэффициент усиления пропорциональной части РС:

$$r_c = \frac{T_j}{2T_{\omega} \cdot \bar{p}_{\text{зт}}} = \frac{0,745}{0,05 \cdot 2,5} = 6,6,$$

где T_j – механическая постоянная времени привода, с;

T_{ω} – некомпенсируемая постоянная времени контура скорости, с;

$\bar{p}_{\text{зт}}$ – входная проводимость РТ по каналу задания.

Передачная функция регулятора скорости:

$$W_{pc} = \frac{T_j}{2T_\omega \cdot \bar{p}_{3T}} = r_c,$$

где T_j – механическая постоянная времени привода, с;

T_ω – некомпенсируемая постоянная времени контура скорости, с;

\bar{p}_{3T} – входная проводимость РТ по каналу задания.

Сопротивление в цепи ОС РС:

$$R_{21расч} = r_c \cdot R_0 = 6,6 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где r_c – коэффициент усиления пропорциональной части РС;

R_0 – базовое сопротивление САР, Ом.

Сопротивление на входе РС по каналу ОСС:

$$(R_{13}^* + R_{14})_{расч} = \frac{R_0}{\bar{p}_{осс}} = \frac{100 \cdot 10^3}{3,2} = 31,25 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где R_0 – базовое сопротивление САР, Ом;

$\bar{p}_{осс}$ – входная проводимость регулятора по каналу ОС.

Сопротивления:

$$R_{21}^* = 660 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{14} = R_{15} = 10 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{12}^* = R_{13}^* = 22 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

4.7 Расчет задатчика интенсивности

Динамический момент двигателя:

$$M_{дин} = 1,5 \cdot M_{дн} = 1,5 \cdot 9,6 \cdot 10^3 = 14,4 \text{ кНм},$$

где $M_{дн}$ – момент двигателя номинальный, кНм.

Время разгона клетки до $\omega_{ном}$:

$$t_p = \frac{\omega_{дн} \cdot I}{1,5 \cdot M_{дин}} = \frac{33 \cdot 216,4}{14,4 \cdot 10^3} = 0,5 \text{ с},$$

где $\omega_{дн}$ – частота вращения номинальная, рад/с;

I – момент инерции двигателя и механизма, кг·м²;

$M_{дн}$ – момент двигателя номинальный, кНм.

Напряжение выхода ЗИ, соответствующее $\omega_{ном}$:

$$U_{зи} = U_o \cdot \frac{\omega_{дн}}{\omega_{max}} = 10 \cdot \frac{33}{105} = 3,14 \text{ В},$$

где U_o – напряжение системы регулирования, В;

$\omega_{дн}$ – частота вращения номинальная, рад/с;

ω_{max} – угловая скорость двигателя максимальная, рад/с.

Темп изменения выходного напряжения, соответствующее $\omega_{дн}/t_p$:

$$\frac{dU_{вых}}{dt} = \frac{U_{зи}}{t_p} = \frac{3,14}{0,5} = 6,28 \frac{\text{В}}{\text{с}},$$

где $U_{зи}$ – напряжение выхода ЗИ, соответствующее $\omega_{ном}$, В;

t_p – время разгона клетки до $\omega_{ном}$, с.

Устанавливаем:

$$C^*_{10} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C^*_{11} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C^*_{32} = 100 \cdot 10^3 \text{ Ф}.$$

Постоянная интегрирования:

$$T_{и} = C^*_{10} \cdot R_{32} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ с},$$

где R_{32} – заданное сопротивление, Ом.

Напряжение ограничения темпа изменения скорости:

$$U_{огр} = \frac{dU_{вых}}{dt} \cdot T_{и} = 6,28 \cdot 0,1 = 0,628 \text{ В},$$

где $\frac{dU_{вых}}{dt}$ – темп изменения выходного напряжения, $\omega_{дн}/t_p$, В/с;

$T_{и}$ – постоянная интегрирования, с.

4.8 Расчет напряжений ограничения регулятора мощности

Напряжение ограничения регулятора мощности (РМ), соответствующее $2,5I_{дн}$ и номинальному потоку, формируется на усилителе А2.3.

Принимаем: $U_{огрi} = 10 \text{ В}$.

Напряжение ограничения регулятора мощности, соответствующее $2I_{дн}$ и минимальному потоку:

$$U_{\text{огр}2} = U_{\text{огр}1} \cdot \frac{\lambda_{\text{po}}}{\lambda_{\text{pn}}} = 10 \cdot \frac{2,5}{2} = 12,5 \text{ В},$$

где λ_{pn} – рабочая перегрузка по току при $n_{\text{дн}}$;

λ_{po} – рабочая перегрузка по току при $n_{\text{дmax}}$.

Напряжение выхода формирователя потока, соответствующее номинальному потоку принимаем: $U_{\text{ф1}} = 10 \text{ В}$.

Напряжение выхода формирователя потока, соответствующее минимальному потоку:

$$U_{\text{ф2}} = U_{\text{ф1}} \cdot \frac{\omega_{\text{дн}}}{\omega_{\text{max}}} = 10 \cdot \frac{33}{105} = 12,5 \text{ В},$$

где $U_{\text{ф1}}$ – напряжение выхода формирователя потока, соответствующее номинальному потоку, В;

$\omega_{\text{дн}}$ – частота вращения номинальная, рад/с;

ω_{max} – угловая скорость двигателя максимальная, рад/с.

4.9 Расчёт ограничения di/dt

Напряжение ограничения выхода усилителя А2.4 устройства А8, соответствующее заданию тока $2I_{\text{дн}}$ принимаем: $U_{\text{вых}} = 10 \text{ В}$.

Тем изменения выходного напряжения, соответствующий темпу изменения тока якоря $\frac{dI_{\text{я}}}{dt}$:

$$\frac{dU_{\text{вых}}}{dt} = \frac{dI_{\text{я}}}{dt} \cdot \frac{U_{\text{вых}}}{2} = 10 \cdot \frac{10}{2} = 50 \frac{\text{В}}{\text{с}},$$

где $\frac{dI_{\text{я}}}{dt}$ – скорость изменения производной тока якоря, А/с.

Постоянная интегрирования ограничения di/dt:

$$T_{\text{и}}^* = C_{13}^* \cdot R_{37} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^3 = 0,007 \text{ с},$$

где $C_{13}^* = C_{15}^*$ – принятая ёмкость в цепи РТ, Ф;

R_{37} – заданное сопротивление, Ом.

Напряжение ограничения усилителя А2.2 устройства А8, соответствующее темпу изменения тока двигателя:

$$U_{\text{огр}} = \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} \cdot T_{\text{и}}^* = 50 \cdot 0,007 = 0,35 \text{ В},$$

где $\frac{dU_{\text{вых}}}{dt}$ – темп изменения выходного напряжения, соответствующий

темпу изменения тока якоря $\frac{dI_{\text{я}}}{dt}$, В/с;

$T_{\text{и}}^*$ – постоянная интегрирования ограничения di/dt , с.

4.10 Расчёт системы возбуждения

Базовые величины:

- базовый ток $I_{\text{бв}} = I_{\text{вн}} = 45,2 \text{ А};$

- базовое напряжение $U_{\text{бв}} = 96,5 \text{ В};$

- напряжение датчика тока возбуждения при $1,2I_{\text{вн}}$ $U_{\text{дтmax}} = 10 \text{ В};$

- напряжение датчика тока возбуждения при $1I_{\text{вн}}:$

$$U_{\text{вн}} = \frac{U_{\text{дтmax}} \cdot I_{\text{вн}}}{1,2 \cdot I_{\text{вн}}} = \frac{10}{1,2} = 8,3 \text{ В},$$

где $U_{\text{дтmax}}$ – напряжение датчика тока возбуждения $1,2I_{\text{вн}};$

$I_{\text{вн}}$ – базовый ток, А.

Коэффициент датчика тока:

$$\bar{K}_{\text{ит}} = \frac{U_{\text{вн}}}{U} = \frac{8,3}{10} = 0,83,$$

где $U_{\text{вн}}$ – напряжение датчика тока возбуждения при $1I_{\text{вн}}$, В;

U_o – напряжение системы регулирования, В.

Входная проводимость РВ по каналу ОС:

$$\bar{p}_{\text{в}} = \frac{1}{\bar{K}_{\text{ит}}} \cdot \frac{U_{\text{вн}}}{U_{\text{ф}}} = \frac{8,3}{0,83 \cdot 10} = 1,$$

где $U_{\text{вн}}$ – напряжение датчика тока возбуждения при $1I_{\text{вн}}$, В;

$\bar{K}_{\text{ит}}$ – коэффициент датчика тока;

$U_{\text{ф}}$ – выходное напряжение измерителя потока, В.

ЭДС холостого хода тиристорного возбудителя:

$$E_{\text{дов}} = k_{\text{ви}} \cdot U_{\text{п}} = 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В},$$

где $\bar{K}_{\text{ви}}$ – коэффициент выпрямления по напряжению;

U_{Π} – напряжение питания тиристорного возбудителя, В.

Напряжение на обмотке возбуждения:

$$U_{BH} = E_{d_{oB}} \cdot \cos(90^\circ - \kappa_{\phi} \cdot U_y) = 513 \sin 20_y,$$

где $E_{d_{oB}}$ – ЭДС холостого хода тиристорного возбудителя, В;

$\kappa_{\phi} = 20$ эл.гр./В – коэффициент фазосмещения;

U_y – напряжение управления, В.

Напряжение управления, соответствующее U_{BH} :

$$U_{yH} = \frac{\arcsin \frac{U_{6B}}{E_{d_{oB}}}}{\kappa_{\phi}} = \frac{\arcsin \frac{96,5}{513}}{20} = 0,54 \text{ В},$$

где U_{6B} – базовое напряжение, В;

$E_{d_{oB}}$ – ЭДС холостого хода тиристорного возбудителя, В;

κ_{ϕ} – коэффициент фазосмещения.

Усредненный коэффициент тиристорного возбудителя:

$$\kappa_{ТПВ} = \frac{E_{do} - U_{6B}}{U_{yo} - U_{yH}} = \frac{513 - 96,5}{6 - 0,54} = 76,3,$$

где $E_{d_{oB}}$ – ЭДС холостого тиристорного возбудителя, В;

U_{6B} – базовое напряжение, В;

U_{yo} – напряжение управление (данные завода), В;

U_{yH} – напряжение управления, соответствующее U_{BH} , В.

Коэффициент тиристорного возбудителя в относительных единицах:

$$\bar{\kappa}_{ТПВ} = \kappa_{ТПВ} \cdot \frac{U_0}{U_{6B}} = 76,3 \cdot \frac{10}{96,5} = 7,9,$$

где $\kappa_{ТПВ}$ – усредненный коэффициент тиристорного возбудителя;

U_0 – напряжение системы регулирования, В;

U_{6B} – базовое напряжение.

Передаточная функция цепи возбуждения двигателя ($\bar{\kappa}_{\phi} = 1$):

$$W_{овд} = \frac{1}{T_{B2} + T_{B1} \cdot \bar{\kappa}_{\phi}} = \frac{1}{1 + T_{B1}p} = \frac{1}{1 + 1,3p},$$

где T_{B1} – первая постоянная времени цепи возбуждения, с;

$T_{в2}$ – вторая постоянная времени цепи возбуждения, с;

\bar{K}_ϕ – коэффициент фазосмещения, эл.гр/В.

Передаточная функция регулятора ЭДС ($\bar{K}_\phi = 1$)

$$\bar{W}_{рв} = \frac{1 + T_{в1}p}{\bar{K}_{ТПВ} \cdot 2T_{\muв}p} = r_{в} \cdot \frac{1 + T_{в1}p}{T_{в1}p} = \frac{1 + 1,3p}{7,9 \cdot 0,04p} = 4,1 \frac{1 + 1,3p}{1,3p},$$

где $T_{\muв}$ – некомпенсируемая постоянная времени контура потока возбуждения, с;

$T_{в1}$ – первая постоянная времени цепи возбуждения, с;

$\bar{K}_{ТПВ}$ – коэффициент тиристорного возбудителя;

$T_{в2}$ – вторая постоянная времени цепи возбуждения, с;

\bar{K}_ϕ – коэффициент фазосмещения, эл.гр./В;

$r_{в}$ – коэффициент пропорциональности.

Частота среза контура регулирования потока возбуждения:

$$\omega_{в} = \frac{1}{2T_{\muв}} = \frac{1}{2 \cdot 0,02} = 25 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

где $T_{\muв}$ – некомпенсируемая постоянная времени контура потока возбуждения, с.

Сопротивление в цепи ОС регулятора ЭДС:

$$R_{11\text{расч}} = r_{в} \cdot R_o = 4,1 \cdot 100 \cdot 10^3 = 410 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $r_{в}$ – коэффициент пропорциональности;

R_o – базовое сопротивление САР, Ом.

Ёмкость в цепи регулятора ЭДС:

$$C_2 = \frac{T_{в1}}{R_{11\text{расч}}} = \frac{1,3}{410 \cdot 10^3} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

где $T_{в1}$ – первая постоянная времени цепи возбуждения, с;

$R_{11\text{расч}}$ – сопротивление в цепи ОС регулятора ЭДС $R_{11\text{расч}} = R_{11}^*$, Ом.

Экономический ток возбуждения:

$$I_{эв} = 0,5 \cdot I_{вн} = 0,5 \cdot 45,2 = 22,6 \text{ А},$$

где $I_{вн}$ – ток возбуждения номинальный, А.

Входное сопротивление по каналу задания номинального тока возбуждения:

$$R_7 = \frac{U_{\text{пит}}}{U_o} \cdot R_o = \frac{12}{10} \cdot 100 \cdot 10^3 = 120 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $U_{\text{пит}}$ – питающее напряжение, В;

R_o – базовое сопротивление САР, Ом;

U_o – напряжение системы регулирования, В.

Сопротивление, вводимое для задания тока возбуждения, равного $0,5I_{\text{вн}}$:

$$R^{**} = \frac{U_{\text{пит}}}{0,5 \cdot \frac{U_o}{R_o}} - R_7 = \frac{12}{0,5 \cdot \frac{10}{100 \cdot 10^3}} - 120 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $U_{\text{пит}}$ – питающее напряжение, В;

R_7 – входное сопротивление по каналу задания номинального тока возбуждения, Ом;

U_o – напряжение системы регулирования, В;

R_o – базовое сопротивление САР, Ом.

Измеритель ЭДС.

Входное напряжение датчика напряжения, соответствующее $U_{\text{дmax}} = 1,15U_{\text{дн}}$: $U'_{\text{дн}} = 10 \text{ В}$.

Выходное напряжение датчика напряжения, соответствующее $U_{\text{дн}}$:

$$U'_{\text{дн1}} = U_{\text{дн}} \cdot \frac{U_{\text{дн}}}{1,5 \cdot U_{\text{дн}}} = 10 \cdot \frac{440}{1,15 \cdot 440} = 8,7 \text{ В},$$

где $U'_{\text{дн}}$ – входное напряжение датчика напряжения, соответствующее $U_{\text{дmax}} = 1,15U_{\text{дн}}$, В;

$U_{\text{дн}}$ – номинальное напряжение двигателя, В.

Передаточный коэффициент датчика напряжения:

$$K_{\text{дн}} = \frac{U'_{\text{дн}}}{1,15 \cdot U_{\text{дн}}} = \frac{10}{1,15 \cdot 440} = 0,0198,$$

где $U'_{\text{дн}}$ – входное напряжение датчика напряжения, соответствующее $U_{\text{дmax}} = 1,15U_{\text{дн}}$, В;

$U_{\text{дн}}$ – номинальное напряжение двигателя, В.

В относительных единицах:

$$\bar{k}_{\text{дн}} = \frac{U'_{\text{дн}} \cdot E_{\text{дн}}}{1,15 \cdot U_{\text{дн}} \cdot U_o} = \frac{10 \cdot 410,33}{1,15 \cdot 440 \cdot 10} = 0,81,$$

где $U'_{\text{дн}}$ – входное напряжение датчика напряжения, соответствующее $U_{\text{дтmax}}$
 $= 1.15U_{\text{дн}}$, В;

$E_{\text{дн}}$ – ЭДС двигателя номинальное, В;

$U_{\text{дн}}$ – номинальное напряжение двигателя, В;

U_o – напряжение системы регулирования, В.

Передаточный коэффициент ДТ, $\bar{k}_{\text{дн}} = 0,44$.

Напряжение выхода усилителя АЗ устройства А7, соответствующее $E_{\text{дн}}$
принимая: $U_{\text{уэ}} = 8,3$ В.

Передаточный коэффициент измерителя ЭДС:

$$k_{\text{э}} = \frac{U_{\text{уэ}}}{E_{\text{дн}}} = \frac{8,3}{410,33} = 0,02,$$

где $E_{\text{дн}}$ – ЭДС двигателя номинальная, В.

В относительных единицах:

$$k_{\text{э}} = \frac{U_{\text{уэ}} \cdot E_{\text{дн}}}{E_{\text{дн}} \cdot U_o} = \frac{8,38}{10} = 0,83,$$

где $U_{\text{уэ}}$ – напряжение выхода усилителя АЗ устройства А7,
соответствующее $E_{\text{дн}}$, В;

$E_{\text{дн}}$ – ЭДС двигателя номинальное, В;

U_o – напряжение системы регулирования, В.

Входная проводимость регулятора ЭДС по каналу ОС по ЭДС:

$$\bar{p}_{\text{э}} = \frac{1}{\bar{k}_{\text{э}}} = \frac{1}{0,83} = 1,2,$$

где $\bar{k}_{\text{э}}$ – передаточный коэффициент измерителя ЭДС в относительных
единицах.

Коэффициенты передачи датчика напряжения и тока:

$$k_1 = \frac{\bar{k}_{\text{э}}}{\bar{k}_{\text{дн}}} = \frac{0,83}{0,81} = 1,02;$$

$$k_2 = \frac{\bar{k}_э \cdot \bar{R}_д}{\bar{k}_{дт}} = \frac{0,83 \cdot 0,074}{0,44} = 0,14,$$

где $\bar{k}_э$ – передаточный коэффициент измерителя ЭДС в относительных единицах;

$\bar{R}_д$ – сопротивление якорной цепи двигателя с учетом ошиновки, Ом;

$\bar{k}_{дт}$ – передаточный коэффициент ДТ.

Сопротивление в цепи ОС усилителя АЗ:

$$R_{18} = k_1 \cdot R_o = 1,02 \cdot 100 \cdot 10^3 = 102 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

где k_1 – коэффициент передачи датчика напряжения;

R_o – базовое сопротивление САР, Ом.

Постоянная фильтра на входе по каналу напряжения: $T_\phi = 0,005 \text{ с}$.

Общее сопротивление входной цепи АЗ от датчика напряжения:

$$R_{13} + R_{15} = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Емкость входной цепи:

$$C_6^* = \frac{T_\phi}{\frac{R_{13} \cdot R_{15}}{R_{13} + R_{15}}} = \frac{0,005}{25,5 \cdot 10^3} 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

где R_{13}, R_{15} – сопротивление входной цепи АЗ от датчика напряжения, Ом;

T_ϕ – постоянная фильтра на входе по каналу напряжения, с.

Сопротивление на входе измерителя ЭДС по каналу тока:

$$R^* = \frac{R_o}{k_2} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,14} = 714 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где R_o – базовое сопротивление САР, Ом;

k_2 – коэффициент передачи датчика тока.

Емкость в цепи дифференцирования сигнала от датчика тока:

$$C^* = \frac{T_d}{R^*} = \frac{0,005}{714 \cdot 10^3} = 7 \cdot 10^{-9} \text{ Ф},$$

где T_d – постоянная дифференцирования, с;

R^* – сопротивление на входе измерителя ЭДС по каналу тока, Ом.

Формирователь потока

В таблице 2 приведены данные для построения характеристики формирователя потока.

Таблица 2 - Данные для построения характеристики формирователя потока

$\Phi \cdot 10^{-2}, \text{ Вб}$	4,85	7	10	12	14	15,43
$I_{\text{в}}, \text{ А}$	8,7	13,4	18,6	28	36	45,2
$U_{\text{ф}}, \text{ В}$	3,14	4,54	6,48	7,8	9,1	10
$U_{\text{ил3}}, \text{ В}$	1,6	2,5	3,4	5,14	6,6	8,3

Индикатор остановки электродвигателя.

Постоянная времени фильтра на входе:

$$[C_3(A7) + C_{11}(A2)] \cdot \frac{R_{33}(A2) \cdot R_{\text{ВХ5}}(A7)}{R_{33}(A2) + R_{\text{ВХ5}}(A7)} = T_{\text{Ф}}.$$

Она подбирается при наладке, исходя из необходимого уровня пульсаций сигнала $\frac{dn_3}{dt}$ (в режиме нуля). Порог срабатывания индикатора сигнала n_3 и n_{ist} устанавливаются минимально возможным из устойчивой настройки, исходя из возможного броска тока 25 % $I_{\text{дн}}$. $T_{\text{ф2}}$ и $T_{\text{ф2}}$ подбираются при наладке, исходя из ограничения пульсаций n_3 и n_{ist} .

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБРАННОГО ВАРИАНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В данной работе рассмотрена реконструкция существующего трубопрокатного производства

В выпускной квалификационной работе предлагается техническое перевооружение и реконструкция уже действующего производства для увеличения роста производства трубной продукции при наименьших капитальных затратах

5.1 Капитальные затраты

Рассмотрим необходимые капитальные вложения на установку нового оборудования.

Капитальные вложения содержать следующие составляющие:

1. Затраты на приобретение оборудования ($K_{об}$).
2. Транспортные расходы ($K_{тр}$).
3. Затраты на монтаж и наладку оборудования ($K_{м}$).

Суммарные капитальные вложения

$$K = K_{об} + K_{тр} + K_{м},$$

Проектируемое оборудование:

- 1. Электродвигатель П2ПМ-500-144-УЗ для калибровочно-вытяжного стана**

Стоимость электродвигателя:

$$K_{об} = 212000 \text{ руб.}$$

Расходы на транспортировку принимаются за 10 % от стоимости оборудования:

$$K_{тр} = 0,1 \cdot K_{об};$$

$$K_{тр} = 0,1 \cdot 212000 = 21200 \text{ руб.}$$

Затраты на монтаж оборудования принимаются в размере 30% от его стоимости они составят:

$$K_m = 0,3 \cdot K_6;$$

$$K_m = 0,3 \cdot 212000 = 63600 \text{ руб.}$$

Капитальные расходы на установку электродвигателя:

$$K = 212000 + 21200 + 63600 = 296800 \text{ руб.}$$

2. Тиристорный преобразователь КТЭ 1000/440

Стоимость преобразователя:

$$K_{об} = 258000 \text{ руб.}$$

Расходы на транспортировку принимаются за 10 % от стоимости оборудования:

$$K_{тр} = 0,1 \cdot K_{об};$$

$$K_{тр} = 0,1 \cdot 258000 = 25800 \text{ руб.}$$

Затраты на монтаж оборудования принимаются в размере 30% от его стоимости они составят:

$$K_m = 0,3 \cdot K_6;$$

$$K_m = 0,3 \cdot 258000 = 77400 \text{ руб.}$$

Капитальные расходы на установку:

$$K = 258000 + 25800 + 77400 = 361200 \text{ руб.}$$

Нынешнее оборудование:

5.2 Расчет эксплуатационных расходов

Суммарные эксплуатационные затраты:

$$C = A + P,$$

где A – амортизационные отчисления, руб./год;

P – затраты на ремонт оборудования, руб./год.

$$A = K \cdot H_A,$$

где A – амортизационные отчисления;

K – стоимость оборудования, руб.;

H_A – норма годовых амортизационных расходов, 1/год.

Затраты на ремонт:

$$P = T_c \cdot Z_{\text{осн}} \cdot K_{\text{доп}} \cdot K_{\text{соц}} \cdot K_p,$$

где T_c – количество нормо-часов, необходимых для выполнения работ, н/ч; $Z_{\text{осн}}$ – часовая тарифная ставка рабочего, выполняющего ремонт, руб./ч; $K_{\text{доп}}$ – доп. зарплата на ремонт, включая налоги и премии, о.е.; $K_{\text{соц}}$ – единый социальный налог, о.е.; K_p – районный коэффициент, о.е.

Проектируемое оборудование:

1. Электродвигатель П2ПМ-500-144-УЗ для Калибровочно-вытяжного стана

Амортизационные отчисления, срок службы 7 лет (по паспортным данным):

$$A = 212000 \cdot 0,14 = 29680 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт:

$$T_c = 150 \text{ н/ч;}$$

$$Z_{\text{осн}} = 62 \text{ руб/ч;}$$

$$K_{\text{доп}} = 1,55;$$

$$K_{\text{соц}} = 1,3;$$

$$K_p = 1,15;$$

$$P = 150 \cdot 62 \cdot 1,55 \cdot 1,3 \cdot 1,15 = 21550,42 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы:

$$C = 21550,42 + 29680 = 51230,42 \text{ руб.}$$

2. Тиристорный преобразователь типа КТЭ 1000/440

Амортизационные отчисления, срок службы 4 лет (по паспортным данным):

$$A = 258000 \cdot 0,25 = 64500 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт:

$$T_c = 100 \text{ н/ч;}$$

$$Z_{\text{осн}} = 62 \text{ руб/ч}$$

$$K_{\text{доп}} = 1,55;$$

$$K_{\text{соц}} = 1,3;$$

$$K_p = 1,15;$$

$$P = 100 \cdot 62 \cdot 1,55 \cdot 1,3 \cdot 1,15 = 14366,95 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы:

$$C = 64500 + 14366,95 = 78866,95 \text{ руб.}$$

5.3 Приведенные затраты

Существующее оборудование имеет меньшую производительность

$$ПЗ = E_n \cdot И + C_n;$$

где И – капитальные вложения в проект;

С – эксплуатационные издержки;

E_n – норматив приведения (принимается 0,12-0,15 в зависимости от нормативного срока окупаемости).

1. Электродвигатель П2ПМ-500-144-УЗ для калибровочно-вытяжного стана

$$ПЗ = 0,12 \cdot 361200 + 51230,42 = 94574,42.$$

2. Тиристорный преобразователь типа КТЭ 1000/440

$$ПЗ = 0,12 \cdot 305200 + 130097,37 = 175877,37 \text{ руб.}$$

В таблице 3 представлены технико-экономические показатели

Таблица 3- технико экономические показатели

Наименование показателей	Единицы измерения	Проектируемый вариант
Стоимость оборудования	руб.	470000
Транспортные расходы	руб.	49000
Монтаж и наладка	руб.	147000
Суммарные капитальные вложения	руб.	361200
Амортизационные отчисления	руб.	49000
Ремонт и обслуживание	руб.	47883,66
Суммарные эксплуатационные расходы	руб.	78866,95
Приведенные затраты	руб	270451

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке ВКР были изучены вопросы технологий производства горячекатаных бесшовных труб большого диаметра на трубопрокатном стане ТПА 350. С удерживаемой оправкой был рассмотрен технологический процесс работы участка «семи клетевой непрерывный стан – трехклетевой калибровочно-вытяжной стан». Рассмотренная технология впервые предполагается к внедрению на одном из трубопрокатных заводов уральского региона.

Калибровочно-вытяжной стан предназначен для стягивания горячей черновой трубы с удерживаемой оправки и окончательным формированием наружного диаметра трубы. Перед задачей в двенадцати клетевой калибровочный стан для привода клеток калибровочно-вытяжного стана применен электропривод постоянного тока с индивидуальным приводом клеток, с питанием двигателей от современных комплектных тиристорных электроприводов серии КТЭУ.

Примененные, в проекте, системы электропривода позволяет удовлетворить всем требованиям технологического процесса трубопрокатного агрегата ТПА 350 с целью получения необходимого качества готовых труб и снижения отходов металла при окончательном изготовлении чистовых труб на участке отделки труб.

В проекте рассмотрен так же вопрос оптимизации системы регулирования во второй зоне регулирования скорости электропривода, применена одноконтурная система регулирования возбуждения с переключающимися обратными связями потока возбуждения двигателя и ЭДС вместо традиционной двухконтурной системы подчиненного регулирования с последовательного включенными контурами регулирования потока возбуждения и ЭДС. Разработана система управления электропривода КВС позволяет удовлетворить всем требованиям

технологического процесса ТПА 350 во всем диапазоне изменения параметров прокатываемых труб.

В ВКР так же произведено технико-экономическое обоснование работы, в котором указаны затраты, эксплуатационные расходы и приведенные затраты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технология и оборудование трубного производства [Текст]: Учебное пособие для студентов ВПО/В.Я.Осадчий, А.С.Вавилин, В.Г.Зимовец, А.П.Коликов – М.: Издательство «Инжиниринг» 2011. – 324с.
2. Горячая прокатка и прессование труб. Изд. 3-е, переработанное и доп. / Данилов А.Ф., Глейберг А.З., Балакин В.Г., – М.: Издательство «Металлургия», 1994. - 576с.
3. Исследование зазоров в линии привода рабочих валков автоматического стана трубопрокатного агрегата [Текст] Металлургическая и горнорудная промышленность/ Рахманов, С. Р., – СПб.: Издательство «Лениздат», 2012. – 85с.
4. Управление электроприводами» [Текст]: Учебное пособие для вузов./ Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г., – СПб.: Издательство «Энергоатомиздат», 2011. – 392с.
4. Технология трубного производства: Учебное пособие / Данченко В.Н., - М.: Издательство «Интерметинжиниринг» 2002. 640 с.
5. Производство горячекатаных труб [Текст]: Учебное пособие для студентов СПО/ Головкин Р.В., – Тюмень – Издательство «Металлургия», 1984. - 262с.
6. Трубопрокатные станы [Текст] Учебник /Вердеревский В.А., Глейберг А.З., Никитин А.С., - М.: Издательство «Металлургия», 1983. - 240 с.
7. Двигатели постоянного тока для автоматизированного электропривода: Учебное пособие /Заборщикова А. В., Мельников В.И. – СПб.: Петербургский гос. университет путей и сообщения, 2014. – 84с.
8. Экономика, организация и управление предприятием: Учебное пособие. – 2-е издание, доп./ Зайцев Н.Л.. – М.: М.: ИНФА-М, 2011. – 455с.
9. Машины и агрегаты трубного производства /Коликов А.П., Романенко В.П., Самусев С.В. – СПб.: Издательство МИСиС 1998. – 536с.

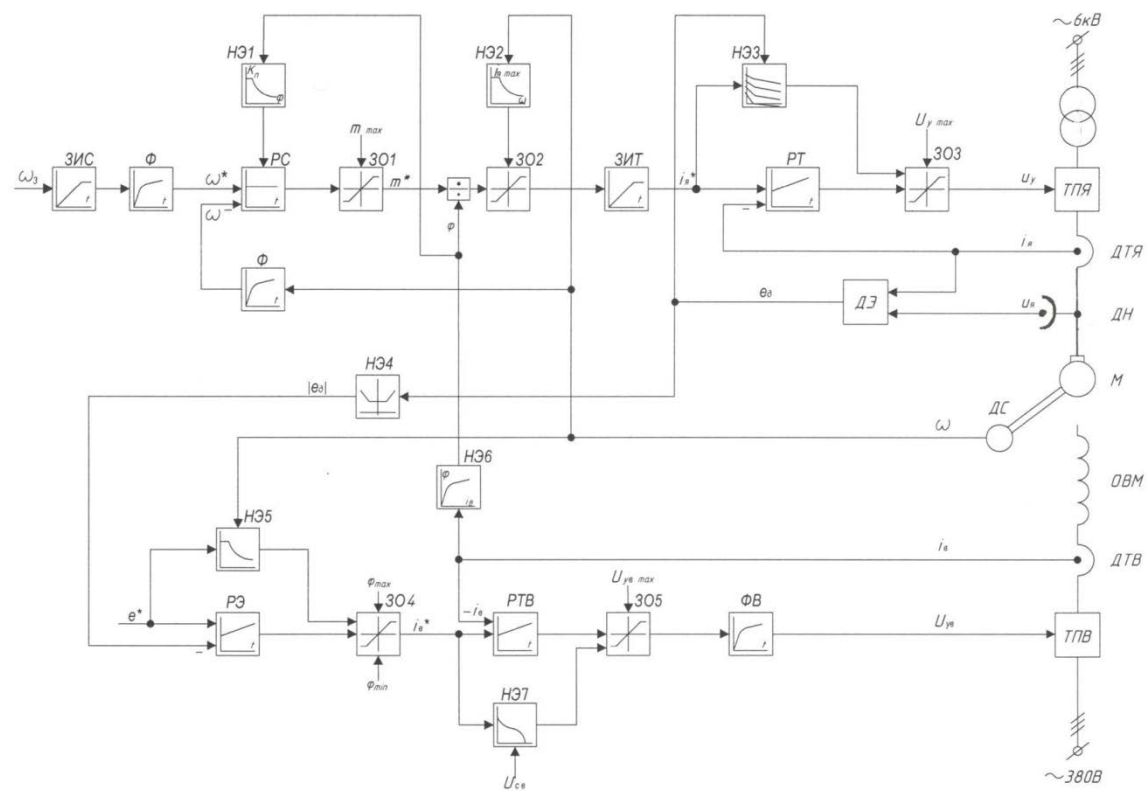
11. Производство труб [Текст]: Учебное пособие для вузов /Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. – М.: Издательство «Металлургия» 2012. - 440 с.
12. Шефтель Н.И. Технология и производство проката. Изд. 4-е, дополненное. – М.: Издательство «Металлургия», 2004. - 462с.
13. Сергеев, В. В. Пути совершенствования непрерывной прокатки труб. – М.: Metallургическая и горнорудная промышленность, 2016. –С. 42-45.
14. Расчеты рабочих клеток прокатных станов [Текст] Методическое пособие для студентов ВПО /Шилов В.А., Инатович Ю.В. – Тюмень: УГТУ. 2011.- 68 с.
15. Фотиев М.М. Электрооборудование прокатных и трубных цехов. – М.: Metallургия,1998. – 256с.
- 16.Трубное производство. Учебник / Романцев Б. А., Гончарук А. В., Вавилкин Н. М., Самусев С. В. - 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство «НИТУ МИСиС» 2011. - 970с.
17. Уткин, Ю. Н. Совершенствование математической модели расчета энергосиловых параметров ТПА 159-426 [Текст] / Ю. Н. Уткин [и др.]. СПб.:Сталь, 2007. - 60с.
- 18.Тартаковский Б.И., Новое оборудование для производства бесшовных труб.СПб.:Сталь, 2008. -82 с.
19. Оборудование прокатных цехов (эксплуатация, надежность): Учебное пособие для студентов сред.спец. учеб. заведений /И.Н.Гулидов. – М.:«Интермет Инжиниринг», 2004. – 320 с.
20. Расчет таблиц и усилий прокатки [Текст]: Учеб.-метод. пособие./ Гончарук А. В., Стоппе Е. В., Осадчий В. А; Московский гос. ин-т стали и сплавов, каф.инновационного проектирования. – М.:Издательство «Учеба», 2007. – 78с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты расчёта двигателя

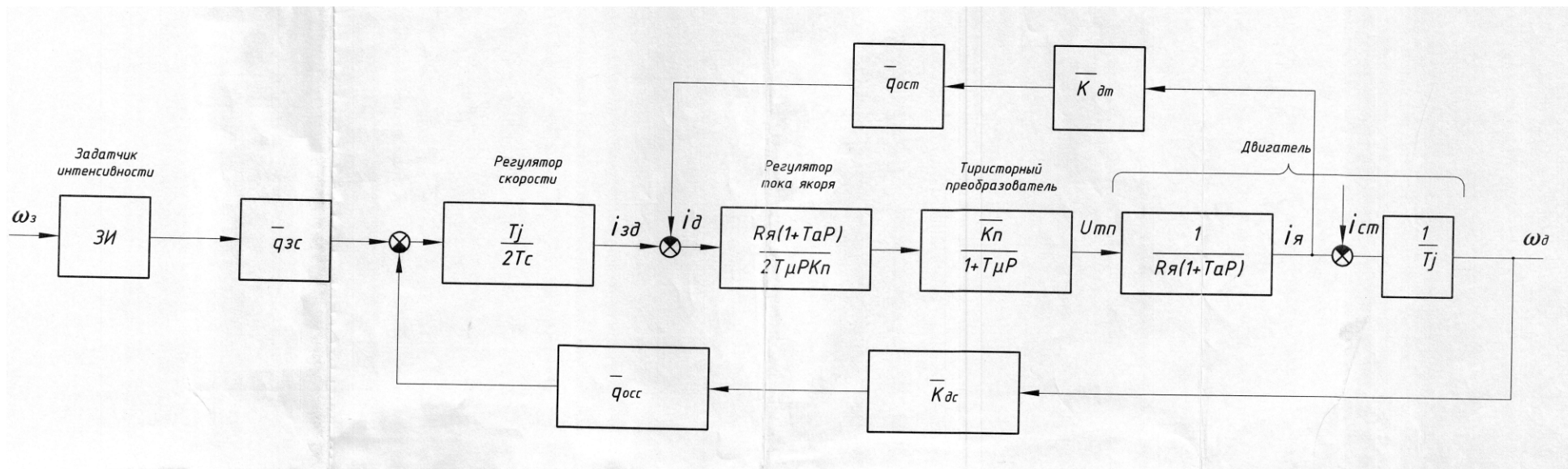
№ Клети	Скорость вращения валков, об/мин	Скорость вращения двигателя, об/мин	Статический момент прокатки, кНм	Статический момент прокатки, приведённый к валу двигателя Мп, кНм.	Время прокатки в клети tn, с.	Время цикла Ш, с.	Момент двигателя при ослаблении поля М', кНм.	Загрузка двигателя статическим моментом прокатки Кс,%	Эквивалентный момент приведённый к валу двигателя Мэ, кНм.
	Труба 219 мм х 12,7 мм х 19,4 м								
1	95-160	297-501	35	12,5	3,89	24,9	16,5	132	5,3
2	100-162	313-507	35	12,5	3,89	24,9	16,6	133	5,3
3	105-164	329-512	35	12,5	3,89	24,9	16,8	134	5,3
	Труба 245 мм х 15,9 мм х 21,41 м								
1	97-114	304-357	37	13,2	6,33	28,4	14,42	108	5,8
2	107-116	335-363	37	13,2	6,33	28,4	14,5	109	5,8
3	109-117	341-366	37	13,2	6,33	28,4	14,6	ПО	5,8
	Труба 325 мм х 9,5 мм х 26 м								
1	125-137	391-429	37	13,2	7,29	29,5	17,26	130	6,2
2	127-139	397-435	37	13,2	7,29	29,5	17,34	131	6,2
3	128-140	400-438	37	13,2	7,29	29,5	17,5	133	6,2
	Труба 325 мм х 12,4 мм х 26 м								
1	97-137	304-429	39	13,8	6,7	28,6	17,26	125	6,7
2	99-139	310-435	39	13,8	6,7	28,6	17,34	126	6,7
3	101-140	316-438	39	13,8	6,7	28,6	17,5	127	6,7

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



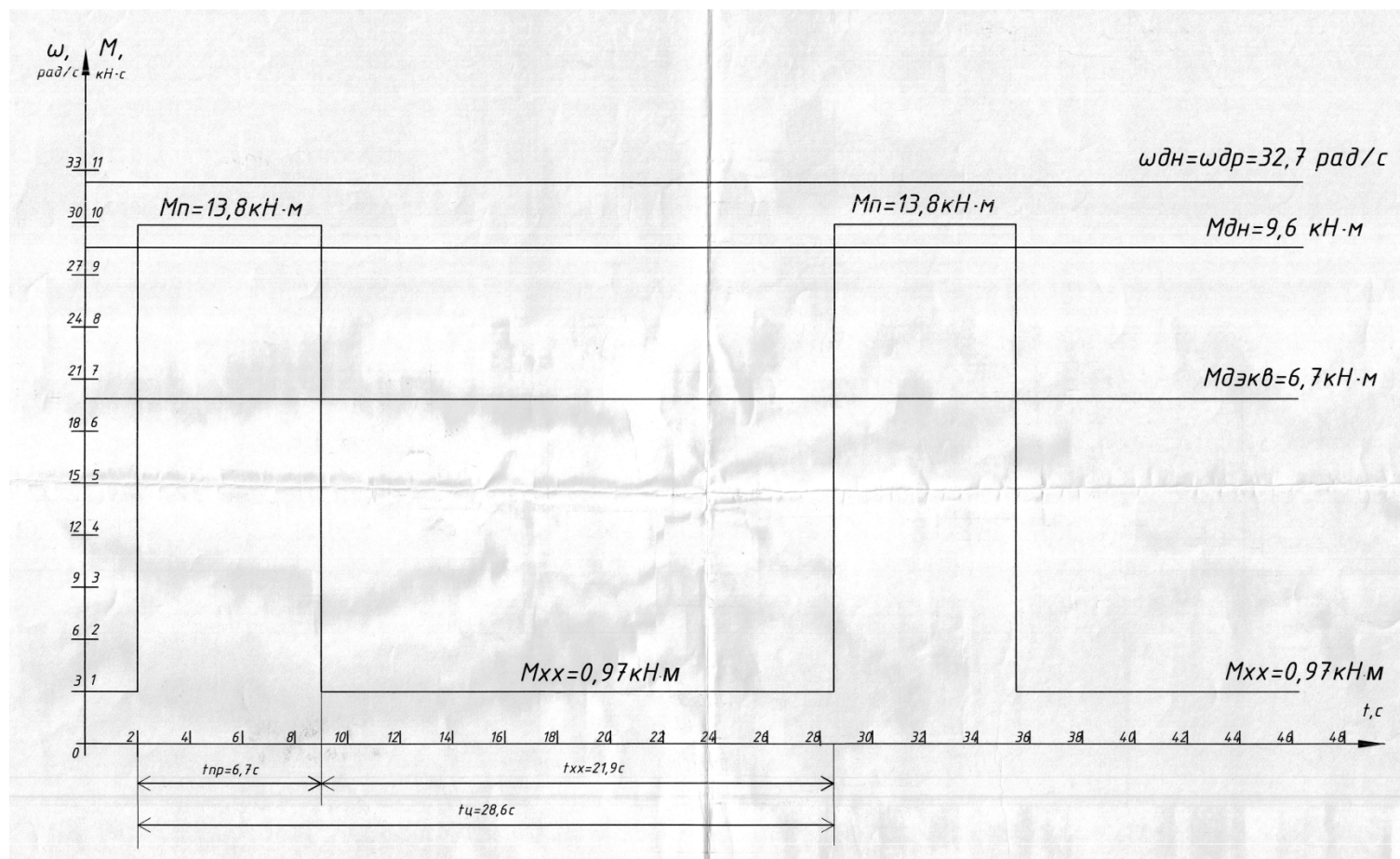
Функциональная схема

ПРИЛОЖЕНИЕ В



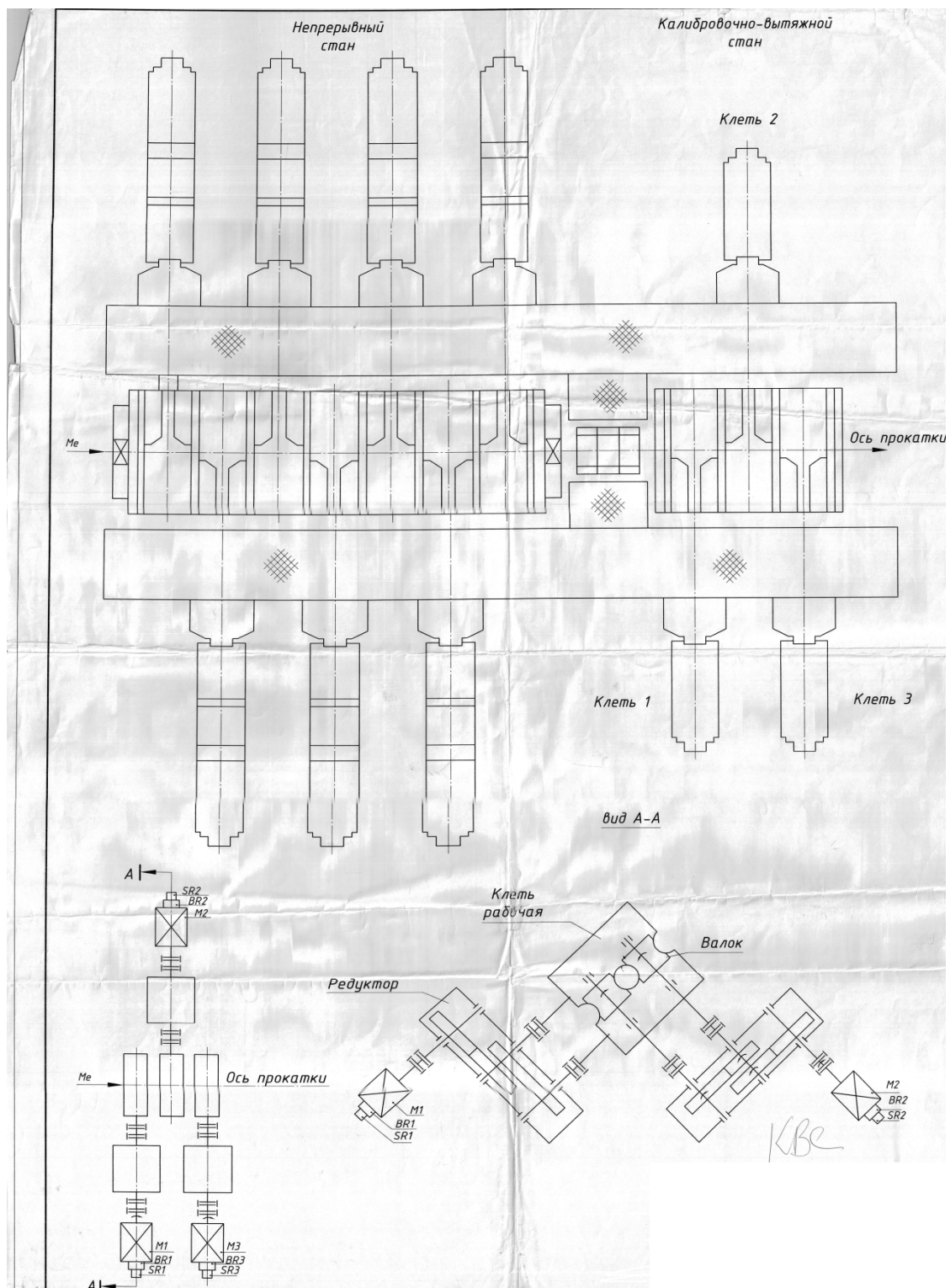
Структурная схема

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Нагрузочная диаграмма электропривода

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



План расположение клеток КВС. Кинематическая схема.

